

Ecophysiologie du sorgho

Rapport de campagne d'hivernage 2006

B. Clerget, M. Sidibe
F. Clavijo-Torres, J. Chantereau, J.C. Evrard, A. Vidal, C. Luce

Projet de recherche ICRISAT/CIRAD



Table des matières

Introduction	3
Comparaison du développement et de la croissance du sorgho, du maïs et du mil	5
Résumé.....	5
Objectif de l'essai.....	5
Matériels et méthodes.....	5
Résultats et discussions	9
1. Cycles et rendements	9
2. Les vitesses de développement et de croissance.....	13
2.1. L'initiation et l'apparition des feuilles.....	13
2.2. L'évolution du tallage	15
2.3. La vitesse de la croissance en hauteur	15
2.4. Les fronts racinaires.....	17
2.4.1. Le front racinaire horizontal.....	17
2.4.2. Le front racinaire vertical.....	17
2.4.3. Le front d'humectation.....	19
2.4.4. L'estimation du volume colonisé par les racines	21
2.5. L'accumulation de la biomasse.....	21
Rendements d'hybrides de sorgho à différentes densités	25
Résumé.....	25
Objectif de l'essai.....	25
Matériel et méthodes	25
Résultats et discussions	29
1. Cycles et rendements	29
2. L'évolution du tallage.....	31
3. La vitesse d'apparition des feuilles.....	33
4. La vitesse de croissance en hauteur	35
5. Les dimensions des feuilles	37
6. Les dimensions des panicules.....	39
Dates d'initiation paniculaire à Bamako et à Montpellier	41
Résumé.....	41
Introduction	41
Matériels et méthodes.....	43
Résultats et discussions	47
1. La date d'initiation paniculaire.....	47
2. Les cinétiques d'apparition des feuilles.....	51

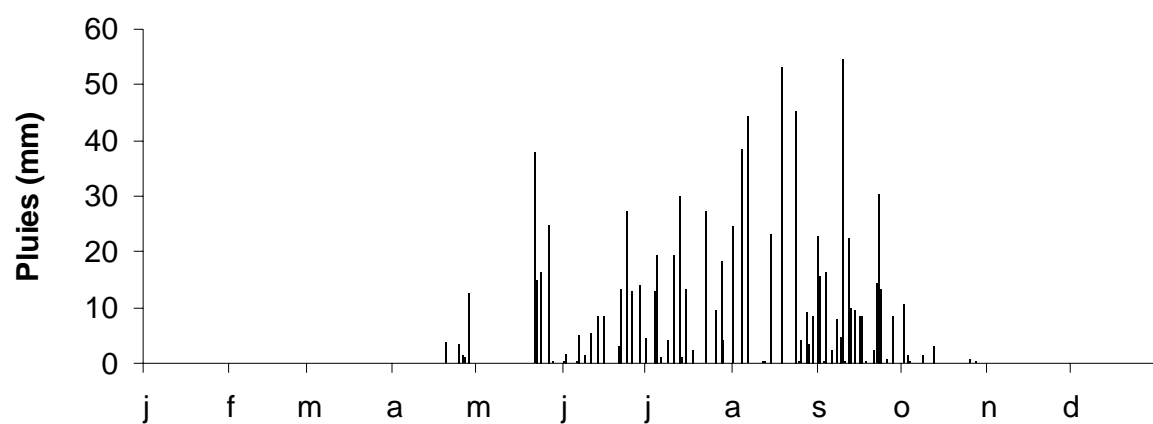


Fig. 0 : Pluies quotidiennes de l'année 2006 à la station de Samanko

Ecophysiologie du sorgho Rapport de campagne d'hivernage 2006

**B. Clerget, M. Sidibe
F. Clavijo-Torres, J. Chantereau, J.C. Evrard, A. Vidal, C. Luce**

Bamako, Mali. Juin 2007

Introduction

Ce projet d'étude de l'écophysiologie du sorgho, conjoint CIRAD et ICRISAT, a débuté en juin 2000. Il a pour objectifs **(1)** de quantifier et de modéliser les interactions du photopériodisme sur la croissance du sorgho en Afrique de l'Ouest en mettant particulièrement l'accent sur les sorghos locaux de race guinea, pour lesquels il n'a pas été publié de modèle opérationnel. **(2)** de proposer à l'aide de simulation un compromis architectural optimal pour une variété de sorgho améliorée et photosensible en fonction de la variabilité du climat par zone d'adaptation.

Ce projet s'inscrit dans une démarche large visant une meilleure utilisation de la biodiversité des sorghos locaux dans les processus régionaux d'intensification des cultures de céréale, en zone de production cotonnière en particulier. Il intéresse plusieurs équipes de sélection, d'agronomie, d'agro-météorologie et de technologie à l'IER (Mali), à l'ICRISAT, au CERAAS (Sénégal) et au CIRAD-Montpellier.

Cette septième campagne d'essais pluviaux a été semée à partir du 26 juin 2006. Elle s'est déroulée dans de bonnes conditions pluviométriques avec un cumul annuel de 912 mm et une répartition correcte des précipitations.

Préparée par B. Clerget, chercheur du CIRAD en charge de ce projet, elle a été très largement conduite et suivie par Mamourou Sidibé, technicien du programme, qui a aussi eu la charge de la saisie informatique de l'ensemble des données.

Trois essais ont été conduits, portant sur la comparaison des vitesses de développement, de croissance et d'enracinement du sorgho, du maïs et du mil, la réponse à la densité des nouveaux hybrides de sorgho de race guinea développés par l'ICRISAT-Mali et enfin une comparaison des dates d'initiation paniculaire et de floraison de variétés de sorgho et de mil à Samanko et à Montpellier, France. L'expérience de Montpellier a impliqué toute l'équipe de l'UPR Biodiversité et la majeure part des notations a été réalisée par un stagiaire colombien, Fernando Clavijo-Torres.

En 2006, le projet a été financé par le CIRAD, l'ICRISAT, le FIDA (Projet PROMISO, TAG#817) et le BMZ/GTZ (Projet 'Enhancing access to genetic diversity through scaling up participatory plant breeding: Roles of different types of farmer and development organization in Mali).

Tableau 1: Dates des principales opérations culturales

Espèce	Densité démariage	Urée en couverture	Semis	Levée	Resemis	Levée resemis	Démariage	Urée + NPK	Urée2
Maïs	67 000	0	27 Jun	02 Jul			14 Jul		
Maïs	67 000	92	27 Jun	02 Jul			14 Jul	24 Jul	17 Aug
Sorgho	67 000	0	27 Jun	01 Jul			14 Jul		
Sorgho	67 000	92	27 Jun	01 Jul			14 Jul	24 Jul	17 Aug
Mil	67 000	0	27 Jun	30 Jun	04 Jul	07 Jul	14 Jul		
Mil	67 000	92	27 Jun	30 Jun	04 Jul	07 Jul	14 Jul	24 Jul	17 Aug
Maïs	133 000	92	13 Jul	16 Jul				09 Aug	05 Sep
Sorgho	133 000	92	13 Jul	16 Jul				09 Aug	05 Sep

Comparaison du développement et de la croissance du sorgho, du maïs et du mil

Résumé

En Afrique de l'Ouest, le sorgho et le mil sont des espèces réputées pour leur rusticité tandis que le maïs est connu pour son meilleur potentiel de rendement associé à une plus grande sensibilité aux stress. L'étude conduite avait pour double objectif d'étudier par comparaison les facteurs de rusticité du sorgho et du mil et les facteurs qui font le potentiel du maïs. Le rendement en grain du maïs dans le sol acide de la station de Samanko a été de 50% supérieur à ceux du sorgho et du mil, sensiblement égaux, après seulement 92 jours de culture contre 132 et 125. La vitesse initiale de production des feuilles a été nettement plus rapide chez le maïs, tandis que les vitesses d'apparition des feuilles et de croissance des tiges des deux espèces ont été quasi-identiques. Chez le mil, le tallage a été beaucoup plus important que chez le sorgho et la réduction du nombre de talles s'est poursuivie plus longtemps, au-delà de la floraison. Les vitesses de croissance en hauteur des 3 espèces ont été proches tandis que la vitesse du front racinaire vertical a été supérieure chez le mil. Les racines pionnières ont poussé en avant du front d'humectation chez les 3 espèces. Les tiges principales des 3 espèces ont accumulé la biomasse à des vitesses proches jusqu'à la maturation du grain mais avec des répartitions différentes. Après la floraison toute la biomasse synthétisée a été accumulée dans l'épi chez le maïs tandis qu'elle a été répartie entre panicule, tige et racines chez le mil et le sorgho dont les tiges restent vertes et ne versent pas pour cette raison. En revanche à la densité de 67 000 pl/ha les talles du mil et du sorgho accumulent peu ou même perdent de la biomasse pendant la phase de remplissage des grains.

Objectif de l'essai

Lorsqu'ils sont semés tôt les sorghos et mils photopériodiques des savanes soudaniennes ont un cycle long avec des vitesses de développement et de croissance réduites à partir du début de la montaison. Cette vitesse de croissance réduite devrait leur conférer un avantage important dans les sols peu fertiles, surtout si la croissance racinaire n'est pas réduite pendant la montaison, ainsi que les observations de biomasse racinaire le laisse penser. L'objectif de l'essai était de mesurer les vitesses verticales et horizontales du front racinaire, ainsi que les vitesses de développement et de croissance, chez une variété locale de sorgho et de mil et chez un maïs cultivé localement, afin de comparer les stratégies de croissance du maïs, du sorgho et du mil.

Matériels et méthodes

L'essai a été semé à la station de Samanko, Mali (12°32N, 8°04W). Un hectare de terrain a été labouré, puis 100 kg de plâtre + 200 kg de NPK (6-20-10) ont été successivement épandus et enfouis mécaniquement. Des billons distants de 0.75 m ont été tracés. Le semis manuel a été effectué le 27 Juin à la distance de 0.20 m sur le rang et avec 10 grains/poquet pour le sorgho et le mil et 3 pour le maïs. Les dates des principales opérations culturales sont reportées dans le tableau 1. La levée a eu lieu 3 à 5 jours plus tard, mais elle n'a pas été bonne chez le mil pour lequel un resemis a été effectué afin d'assurer la densité de plants recherchées.

Le démariage à 1 plant/poquet a été effectué 2 semaines après la levée. Les sarclages et les apports d'engrais étaient effectués simultanément.

L'essai comportait d'une part la variété de sorgho de race guinea CSM 335, utilisée comme témoin dans les essais réalisés à Samanko et parfaitement adaptée à la zone. D'autre part, la variété de mil Sanioba 03, fournie par le programme de sélection du mil, IER-Cinzana pour être adaptée à la zone de Bamako, avec une date de floraison proche de celles des sorghos locaux. Et enfin une variété de maïs achetée auprès d'un paysan du village de Samanko afin de s'assurer de disposer d'une variété bien adaptée aux conditions locales. Il s'agissait d'une variété jaune-orange cornée appelée kababléni (maïs rouge). Chaque espèce a été semée sur une parcelle de 50 x 5 m, divisée en 2 sous-parcelles de 50 et de 21 lignes de 5 m. Les 3 parcelles étaient contiguës, séparées par une allée de 2 m.

Dans les grandes sous-parcelles a été appliquée une forte fertilisation en couverture : un mois après la levée 100 kg/ha d'urée + 200 kg/ha de NPK (6-20-10) ont été apportés, puis 100 kg/ha d'urée 2-3 semaines plus tard. Les petites sous-parcelles n'ont pas reçue de fertilisation en couverture.

Des placettes de 1 ou 2 lignes affectées à différents usages ont été identifiées dans ces sous-parcelles en prenant soin d'intercaler deux lignes intermédiaires non-utilisées afin de ne pas modifier la densité dans l'environnement des plantes destinées à être mesurées (Tableau 2).

Tableau 2 : Liste des placettes dans chaque sous-parcelle

Placettes	Parcelle fertilisée (50 lignes)	Parcelle non-fertilisée (21 lignes)
Suivi hebdomadaire de 10 plantes	3	2
Prélèvement hebdomadaire de 1 plante	3	2
Récolte de 10 plantes à début montaison et floraison	3	-
Fosses pour suivi racinaire chaque 1 puis 2 semaines	2	-
Récolte de 2 lignes	3	2

La phénologie et la croissance ont été mesurées de façon non-destructive chaque semaine sur des placettes de 10 plantes consécutives, repérées de 1 à 10 (Feuilles apparues, hauteur de plante, nombre de talles) et par dissection de 1 plante par placette (Feuilles initiées, date de l'initiation paniculaire, hauteur de la tige). Les dates des stades épiaison ou feuille-drapeau, floraison et maturité ont été enregistrées comme la date à laquelle 50% des plantes d'une des lignes de la sous-parcelle avaient atteint le stade concerné (épis apparu ou feuille-drapeau déployée, floraison de la moitié de la panicule et point noir sur les grains de la base de la panicule).

Les fronts racinaires ont été mesurés chaque semaine pendant le premier mois puis chaque deux semaines dans deux fosses par parcelle fertilisée creusées dans le premier et le dernier tiers de leur longueur et séparées par au moins un rang des placettes. En surface, les racines horizontales étaient peu à peu décapées à partir de la section verticale de la fosse afin de déterminer la distance maximum atteinte à partir de la plante. En profondeur la fosse était creusée jusqu'à ne plus rencontrer de racines.

A la récolte, des placettes de deux lignes ont été échantillonnées dans chaque parcelle. Les nombres de plants et de panicules étaient comptés puis les masses fraîches tiges + feuilles et panicules étaient pesées. Un échantillon de 10 plantes successives d'une même ligne était

préalablement isolé de l'une des deux lignes, traité comme précédemment, puis mis à sécher afin de déterminer les masses sèches de tige, feuille, axes de la panicule et grain et poids de 100 grains.

Deux parcelles supplémentaires de sorgho et de maïs ont été semées le 13 juillet afin de mesurer dans une grande parcelle l'effet de la forte densité sur ces cultures. Chaque parcelle comportait 13 lignes de 10 m distantes de 0,75 m. Le semis a été effectué en poquets distants de 0,20 m sur le rang avec 10 grains/poquet pour le sorgho et 3 grains/poquet pour le maïs. Un démariage à 2 plants par poquet a été effectué 2 semaines après la levée afin d'établir une culture à 133 000 plants/ha. Deux placettes de 10 plantes consécutives ont été repérées dans chaque parcelle et ont fait l'objet d'un suivi hebdomadaire non-destructif du développement des plantes, décrit plus haut. La récolte a été réalisée dans 2 placettes de 2 lignes dans chacune des parcelles.

Les données météorologiques étaient enregistrées automatiquement (Centrale 21X, Campbell Scientific Ltd, Shephed, Loughborough, UK) au pas de temps horaire dans le parc météo de la station de Samanko, à 500 m de la parcelle.

Une série de 8 capteurs d'humidité du sol (Watermark 200, Irrometer Co., Riverside CA, USA) a été mise en place chaque 25 cm dans un trou de 2 m de profondeur. Une thermistance (107, Campbell Scientific) et 3 thermocouples cuivre/constantan ont été mis en place tous les 50 cm dans un autre trou de 2 m de profondeur proche du premier. Les potentiels hydriques étaient mesurés chaque 6 heures et enregistrés par une centrale d'acquisition (21X, Campbell Scientific). Afin de s'affranchir des variations rythmiques quotidiennes des mesures, probablement liées aux variations de température, seule la mesure de 6 heures du matin a été utilisée.

L'ensemble des données a été traité à l'aide du logiciel SAS¹. En particulier les coefficients de nombreuses régressions non-linéaires de la croissance sur le temps thermique ont été calculées par optimisation itérative (Proc Nlin), sur la base du modèle bilinéaire suivant :

$$A = \min(\text{Somme_T}, \text{seuil1})$$

$$B = \min(\text{seuil2} - \text{seuil1}, \max(0, \text{Somme_T} - \text{seuil1}))$$

$$\text{Observation} = b_0 + b_1 * A + b_2 * B$$

avec Somme_T : le temps thermique ; seuil1 et seuil2 : le temps thermique aux points d'inflexion du modèle ; b0, b1 et b2 les coefficients de la régression.

¹ SAS. 2004. Version 9.1. Cary, NC (USA), SAS Institute Inc.

Tableau 3 : Dates des principaux évènements phénologiques

Espèce	Densité au démariage	Urée en couverture	Semis	Feuille- Drapeau	Epiaison	Floraison	Récolte
Mais	67000	0	27 Jun		14 Aug	18 Aug	27 Sep
Mais	67000	92	27 Jun		14 Aug	18 Aug	27 Sep
Sorgho	67000	0	27 Jun	16 Sep		29 Sep	06 Nov
Sorgho	67000	92	27 Jun	16 Sep		29 Sep	06 Nov
Mil	67000	0	27 Jun	30 Aug		18 Sep	30 Oct
Mil	67000	92	27 Jun	30 Aug		18 Sep	30 Oct
Mais	133000	92	13 Jul		28 Aug	02 Sep	17 Oct
Sorgho	133000	92	13 Jul	24 Sep		04 Oct	14 Nov

Tableau 4 : Rendements et composantes du rendement à la densité de 67 000 pl/ha

Espèce	Azote en couverture (kg/ha)	Densité finale (pl/m ²)	MS aérienne (t/ha)	MS grain (t/ha)	Indice de récolte (%)	Tallage (talle/ plante)	Nombre de grains/ panicule principale	Rendement égrenage de la panicule (%)	MS aérienne/ plante (g)	MS grain/ panicule principale (g)	MS grain/ plante (g)	Poids d'un grain (mg)
Mais	0	6.7	9.20	2.69	29.8	0	195	60	138	40	40	198
	92	6.7	12.58	4.56	36.2	0	365	63	187	68	68	198
Sorgho	0	6.0	13.29	2.49	18.7	0	2053	71	220	41	41	19
	92	6.3	17.88	2.95	16.5	0.3	2353	71	284	43	47	19
Mil	0	6.0	15.89	1.97	12.5	0.9	2341	57	265	24	32	12
	92	6.2	20.63	2.73	13.4	0.9	3244	64	333	29	44	10
stderr			1.13	0.32	1.8	0.11	239					2
lsd			2.56	0.72	4.0	0.24	541					3
Facteurs de l'AOV												
Espèce			***	**	***	***	***					***
Fertilisation			***	**	ns	ns	*					ns
Espèce x fertilisation			ns	ns	*	ns	ns					ns

Tableau 5 : Rendements et composantes du rendement à la densité de 133 000 pl/ha

Espèce	Biomasse totale (t/ha)	Rendement en grain (t/ha)	Indice de récolte (%)	Nombre de grains par panicule	Poids d'un grain (mg)
Mais	11.02	2.32	21.2	146	187
Sorgho	13.41	2.84	21.6	2464	19
Erreur standard	1.8	0.2	1.5	182	6
ppds	7.9	0.9	6.5	784	25
Facteurs de l'AOV					
Variété	ns	ns	ns	**	**

Résultats et discussions

1. Cycles et rendements

La floraison du maïs est intervenue 52 jours après le semis, celle du mil qui a été un peu plus précoce que le sorgho, après 83 jours et celle du sorgho à 94 jours (Tableau 3). Les récoltes ont été effectuées à la maturité du grain, afin d'éviter les pertes rapides de biomasse des tiges qui se produisent pendant le séchage du grain et faussent cette mesure. Le cycle total de cette variété précoce de maïs a donc été de 92 jours, contre 125 et 132 jours pour le mil et le sorgho respectivement.

Dans les parcelles fertilisées, le rendement en grain du maïs, 4,6 t/ha, a été 50% supérieur à celui du sorgho, 3,0 t/ha (Tableau 4). Ce rendement du sorgho est proche de celui de 2005, au niveau du potentiel de ce type de variété, et conforme à ce qui était attendu. En revanche le niveau de rendement atteint par le maïs a été nettement inférieur à celui de 2005 où il atteignait 6,2 t/ha. Comme attendu, le rendement du maïs est beaucoup plus variable d'une année à l'autre que celui du sorgho. Il reste toutefois nettement plus élevé pour une durée de cycle inférieure de 40 jours à celle du sorgho.

Avec 2,7 t/ha le rendement de la variété de mil testée a été proche de celui du sorgho, en dépit d'une forte attaque des grains de mil par l'ergot.

Dans les parcelles non-fertilisées en couverture les rendements en grain ont été inférieurs de 41, 16 et 28 % à ceux des parcelles fertilisées pour le maïs, le sorgho et le mil, respectivement. Ces différences ne sont significatives que pour le maïs et le mil (Tableau 4). Le sorgho a donc été la culture qui a le moins répondu à la fertilisation azotée, le maïs celle qui l'a mieux valorisée et le mil a eu une réponse intermédiaire.

Les chutes de production de biomasse ont été de 29, 26 et 23 %, respectivement, toutes significatives, et donc voisines chez les 3 espèces. La fertilisation a donc augmentée de manière assez homogène la taille de l'appareil végétatif des plantes des 3 espèces et de manière spécifique la taille de l'appareil reproducteur. En conséquence, l'indice de récolte a été réduit de -6 et -1 % de chez le maïs et le mil, respectivement, mais augmenté de + 2 % chez le sorgho. A faible fertilité le maïs a conservé une production équivalente à celle du sorgho et supérieure à celle du mil et un indice de récolte encore nettement supérieur à celui des deux autres espèces. Il est permis d'espérer qu'un sorgho ou un mil bien adapté avec un meilleur indice de récolte se comportera de même à faible fertilité.

Dans les parcelles à haute densité le rendement en grains du sorgho a été de 2,8 t/ha, proche des 3,0 t/ha observées à la densité inférieure, tandis qu'il n'a été que de 2,3 t/ha chez le maïs, donc inférieur de moitié au rendement à densité inférieure. Les plantes de maïs ont beaucoup souffert de la forte densité et la verse a été presque totale dans la parcelle (Tableau 5).

L'analyse des composantes du rendement (Tableau 4) montre que les densités à la récolte ont été un peu supérieures chez le maïs (6,7 pl/m², égale à la densité au semis) à celles du sorgho et du mil (6,0 à 6,3 pl/m², avec un petit effet de la fertilisation). Par conséquent chaque plant de maïs a produit une masse de grain 50% supérieur à celle des plants de sorgho et de mil dans les parcelles fertilisées (68 contre 47 et 44 g). Et ceci, malgré que la biomasse aérienne totale des plants de maïs ait été très inférieure à celle des plants de sorgho et de mil (187 g contre 284 g et 333 g). Et dans les parcelles non-fertilisées, la production de grain par plante a donc été comparable chez le sorgho et le maïs. Corrélativement, l'indice de récolte a été significativement différent entre chacune des espèces aux deux niveaux de fertilité. Mais, il n'a été significativement affecté par la fertilisation que chez le maïs.

Tableau 6 : Synchronisation de la phénologie de la plante et de la croissance de ses racines

Espèce	Phénologie	Temps thermique (°C.j)	Date	Jours après levée
Maïs	Levée	0	2-juil.	0
	Initiation paniculaire	328	22-juil.	20
	Début montaison	450	30-juil.	28
	Fin croissance horizontale racines	553	6-août	35
	Apparition feuille-drapeau	628	12-août	41
	Floraison	723	18-août	47
	Fin montaison	807	23-août	52
	Fin croissance verticale racines	1004	6-sept.	66
	Maturité	1297	27-sept.	87
Mil	Levée	0	30-juin	0
	Fin croissance horizontale racines	489	31-juil.	31
	Début montaison	573	7-août	38
	Initiation paniculaire	600	8-août	39
	Inflexion feuilles apparues	691	14-août	45
	Apparition feuille-drapeau	1061	8-sept.	70
	Floraison	1197	18-sept.	80
	Fin montaison	1211	19-sept.	81
	Fin croissance verticale racines	1348	28-sept.	90
	Maturité	1818	30-oct.	122
Sorgho	Levée	0	1-juil.	0
	Début montaison	540	4-août	34
	Inflexion feuilles apparues	646	12-août	42
	Fin croissance horizontale racines	662	14-août	44
	Initiation paniculaire	670	14-août	44
	Apparition feuille-drapeau	1245	22-sept.	83
	Floraison	1341	29-sept.	90
	Fin montaison	1354	13-oct.	104
	Fin croissance verticale racines	1380	1-oct.	92
	Maturité	1893	6-nov.	128

Les plants de sorgho des parcelles fertilisées n'ont conservé en moyenne 0,3 talles/plant au moment de la récolte qui ont porté 9% de la récolte de grain. Dans les parcelles non-fertilisées, les plants de sorgho ne portaient plus de talles au moment de la récolte. Les plants de mils ont conservé 0,9 talles/plant au moment de la récolte qui ont porté 34% de la récolte de grain dans les parcelles fertilisées et 25% dans les parcelles non-fertilisées. Ces résultats mettent à nouveau en évidence que le faible rôle joué par le tallage chez le sorgho dès que la densité de semis atteint 6,7 pl/m². Au contraire chez le mil cultivé à la même densité, déjà forte au regard des espacements généralement pratiqués, les talles conservent un rôle important dans la production de grains.

A haute densité la production de biomasse totale a été réduite de 4,5 t/ha chez le sorgho, mais il s'agit principalement d'une conséquence du retard de semis qui a induit un raccourcissement de 2 semaines de la phase semis-floraison, passant de 94 à 81 jours (Tableau 2). La biomasse du maïs a diminuée de 1,5 t/ha à haute densité alors que le cycle semis-floraison est resté constant et égal à 51 jours. En conséquence, l'indice de récolte a légèrement augmenté chez le sorgho cultivé à haute densité, en liaison avec une faible augmentation du nombre de grains par panicules et une stabilité totale du poids individuel des grains. En revanche, l'indice de récolte du maïs s'est effondré de près de la moitié à haute densité, en lien avec une chute de 60% du nombre de grain par épis et une faible diminution du poids individuel des grains.

L'absence de fertilisation a significativement réduit de 47, 13 et 28 % le nombre de grains de l'épi de maïs et des panicules principales du sorgho et du mil, tandis que le poids des grains n'était pas significativement modifié. La chute des rendements en grains (41,16 et 28%) en réponse à l'absence de fertilisation est donc principalement liée à une chute du nombre de grains sur les panicules.

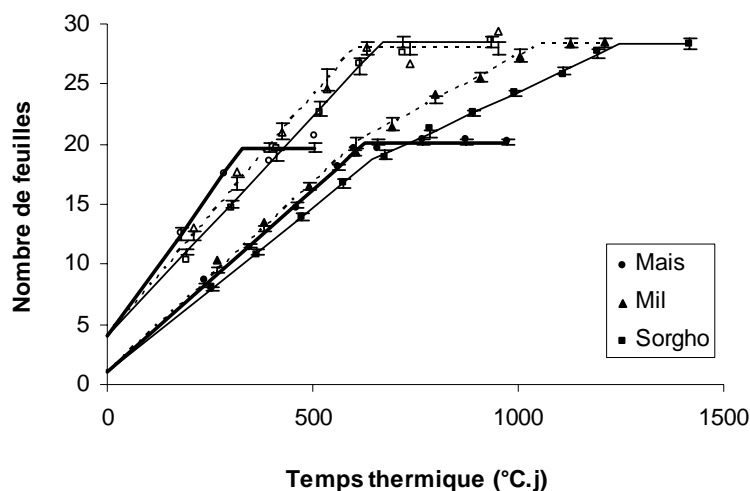


Fig. 1 : Cinétiques d'initiation (symboles ouverts) et d'apparition des feuilles (symboles fermés) dans les parcelles à densité de 67 000 pl/ha fertilisées en couverture. Les barres indiquent l'intervalle de confiance des moyennes estimées par régression. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation.

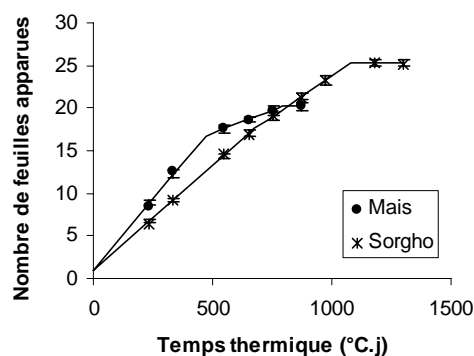


Fig. 2 : Cinétiques d'apparition des feuilles dans les parcelles à densité de 133 000 pl/ha fertilisées en couverture. Les barres indiquent l'intervalle de confiance des moyennes estimées par régression. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation.

Tableau 7 : Vitesses d'initiation et d'apparition des feuilles.

Espèce	Densité au démarrage	Urée en couverture	Plastochrone ($^{\circ}\text{C.j}^{-1}.\text{feuille}^{-1}$)		Phyllochrone ($^{\circ}\text{C.j}^{-1}.\text{feuille}^{-1}$)	
			Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2
Maïs	67000	0	19 ± 2.4		32 ± 0.5	
Maïs	67000	92	21 ± 1.4		33 ± 0.5	
Sorgho	67000	0	26 ± 1.8	34 ± 9.4	37 ± 1.4	67 ± 10.0
Sorgho	67000	92	27 ± 0.9		36 ± 0.8	62 ± 5.3
Mil	67000	0	25 ± 1.1		29 ± 1.1	52 ± 4.1
Mil	67000	92	25 ± 1.1		32 ± 0.7	55 ± 9.6
Maïs	133000	92			30 ± 1.2	
Sorgho	133000	92			41 ± 1.0	53 ± 12.7

2. Les vitesses de développement et de croissance

2.1. *L'initiation et l'apparition des feuilles*

La phase végétative du maïs a duré 3 semaines, jusqu'au 22 juillet, au moment de l'initiation paniculaire, pendant lequel l'apex a produit 15 feuilles en sus des 5 feuilles déjà présentes dans le germe (Tableau 6, Fig. 1). Ces 15 feuilles ont été produites à intervalles réguliers, constants et indépendants de la fertilisation de 20°C.j (Tableau 7).

Chez le sorgho, la phase végétative a duré 1 mois et demi, jusqu'au 14 août, pendant lesquels l'apex a produit 24 feuilles en sus des 4 feuilles déjà présentes dans le germe. Ces 24 feuilles ont été produites à intervalles réguliers et constants dans les parcelles fertilisées de 27 °C.j. En revanche cet intervalle s'est allongé dans les parcelles non-fertilisées pour atteindre 34 °C.j après 300 °C.j, ou 3 semaines de culture.

Chez le mil, la phase végétative a duré 40 jours, jusqu'au 8 août, pendant lesquels l'apex a produit 24 feuilles en sus des 4 feuilles déjà présentes dans le germe. Ces 24 feuilles ont été produites à intervalles réguliers, constants et indépendants de la fertilisation de 25 °C.j.

De même que pour le rythme apical, le rythme d'apparition des feuilles a été constant, indépendant de la fertilisation et égal à 33 °C.j⁻¹.feuille⁻¹ chez le maïs, mais variable au cours du cycle chez le sorgho et le mil, égal respectivement à 36 et 32 °C.j⁻¹.feuille⁻¹ pendant la phase 1 puis 62 et 55 °C.j⁻¹.feuille⁻¹ pendant la phase 2. Chez le mil l'absence de fertilisation a significativement réduit le phyllochrone de 3 °C.j⁻¹.feuille⁻¹ pendant la phase 1.

A haute densité le phyllochrone initial du sorgho a été légèrement plus long, tandis que le phyllochrone secondaire a au contraire été plus court (Fig. 2, Tableau 7). Cet effet, connu, est dû au semis plus tardif et il a prévalu sur l'allongement du phyllochrone secondaire attendu à haute densité. Chez le maïs le phyllochrone n'a pas varié avec la densité. Il n'existe pas de données permettant de savoir s'il aurait varié pour une même date de semis.

Le rythme d'initiation des feuilles a donc été plus rapide chez le maïs et voisin chez les 2 autres espèces, tandis que les rythmes d'apparition des feuilles du maïs et du mil ont été voisins et supérieurs à celui du sorgho. Le rapport entre les rythmes d'initiation et d'apparition a ainsi été de 1,74 chez le maïs contre 1,33 et 1,28 chez le sorgho et le mil pendant la première phase puis 2,3 et 2,2 ensuite. La conséquence est que le temps de développement des organes reproducteurs, compris entre l'initiation paniculaire et la sortie de la dernière feuille, ont été de 300, 575 et 460 °C.j, ou 21, 38 et 31 jours pour le maïs et le sorgho et le mil respectivement.

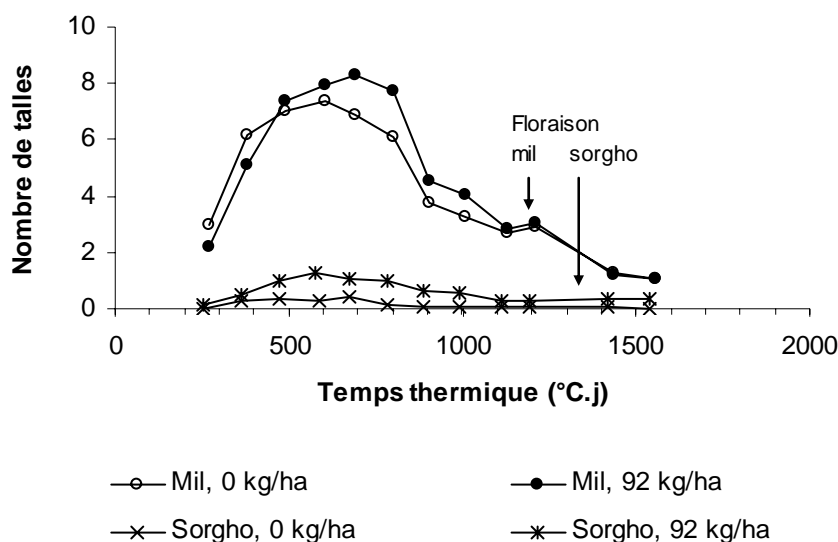


Fig. 3 : Evolution du nombre moyen de talles par plante dans les parcelles de mil et de sorgho à la densité de 67 000 pl/ha, en fonction de la fertilisation.

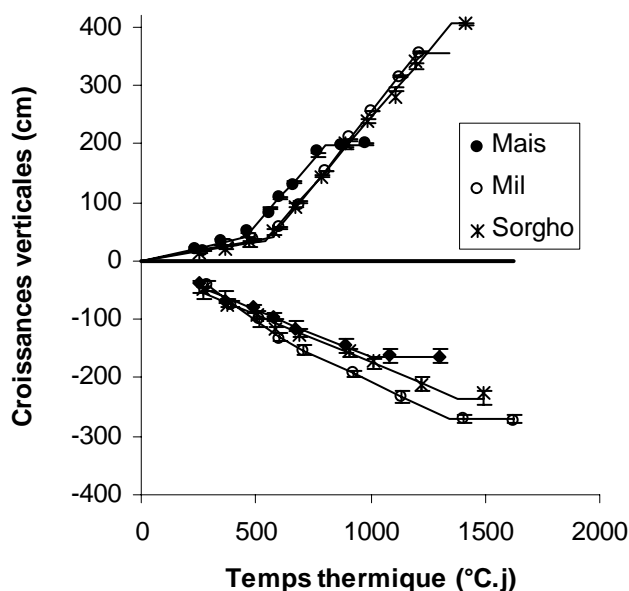


Fig. 4 : Cinétiques des croissances verticales des plantes et des racines à la densité de 67 000 pl/ha et avec fertilisation en couverture. Les barres indiquent l'erreur standard de la mesure. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation.

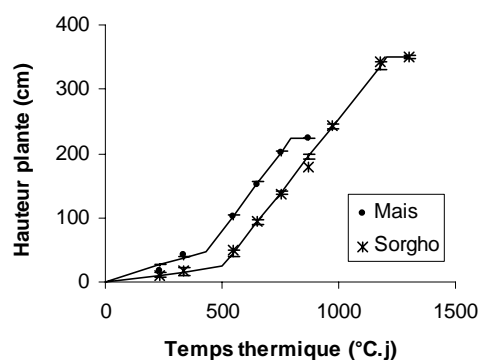


Fig. 5 : Cinétiques des croissances verticales des plantes à la densité de 133 000 pl/ha. Les barres indiquent l'erreur standard de la mesure. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation.

Tableau 8 : Vitesses de croissance en hauteur de la plante.

	Croissance en hauteur (cm/jour)				
	67 000 pl/ha			133 000 pl/ha	
	Mais	Mil	Sorgho	Mais	Sorgho
Phase 1	1.4	1.1	1.0	1.7	0.7
Montaison	6.5	7.2	6.6	7.1	6.8

2.2. L'évolution du tallage

La production de talles est très variable entre les plantes et par conséquent les données représentent un nombre moyen de talles à l'échelle de la parcelle pour lequel l'écart-type est très important. Les plantes de sorgho et de mil ont produit des talles jusqu'au début de la montaison vers 650 °C.j. Les premières talles sont apparues très tôt chez le mil, vers 200 °C.j ou 15 jours après levée et une semaine plus tard chez le sorgho, vers 300°C.j. (Fig. 3). Aucune talle n'a été observée chez le maïs.

Pendant la montaison une partie des talles sont dominées par les talles plus grands et meurent. Cette phase de réduction du nombre des talles est achevée avant la floraison chez le sorgho, tandis qu'elle s'est poursuivie au cours de la phase de remplissage des grains chez le mil.

2.3. La vitesse de la croissance en hauteur

La montaison, due à l'élongation des entre-nœuds de la tige, a débuté le 22 juillet chez le maïs, le 7 août chez le mil et le 4 août chez le sorgho. Elle a commencé 8 jours après l'initiation paniculaire chez le maïs, 1 et 10 jours avant l'initiation paniculaire chez le mil et sorgho respectivement (Tableau 6). Montaison et initiation paniculaire n'apparaissent donc pas liées dans cette expérience. En revanche, elle a commencé 7 jours avant la date d'inflexion du rythme d'initiation des feuilles chez le mil et 8 jours avant chez le sorgho, confirmant ainsi les observations précédentes sur la liaison des 2 évènements.

Elle s'est faite à une vitesse régulière et très voisine entre espèces comprise entre 6.5 et 7.2 cm/jour (Fig. 4 et tableau 8). Les vitesses de croissance ont été presque inchangées dans les parcelles à haute densité, probablement légèrement supérieure chez le maïs (Fig. 5).

Comme en 2005, ce résultat infirme donc l'hypothèse d'une croissance en hauteur quotidienne moindre de la tige du mil ou du sorgho par rapport au maïs, qui induirait une augmentation plus lente de la biomasse et qui participerait à l'adaptation aux sols peu fertiles.

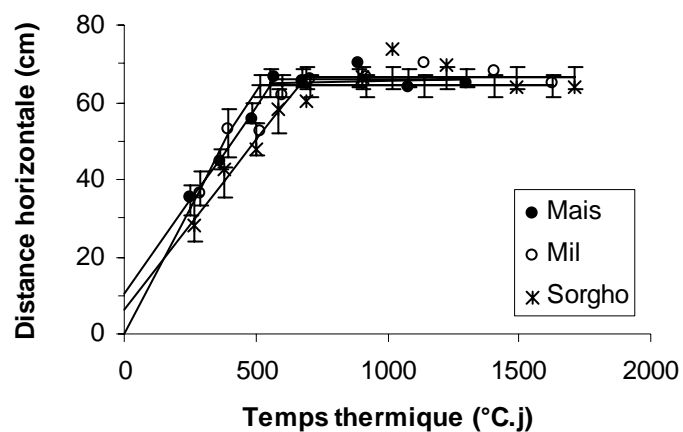


Fig. 6 : Cinétiques de croissance horizontale du front racinaire. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation. Les barres indiquent l'intervalle de confiance des moyennes estimées.

Tableau 9 : Vitesses des fronts racinaires horizontaux et verticaux

	Croissance racinaire (cm/jour)		
	Mais	Mil	Sorgho
Horizontale	1.8	1.8	1.5
Verticale phase 1	2.4	3.6	2.4
Verticale phase 2		2.7	

2.4. Les fronts racinaires

Comme en 2005, le suivi de la croissance des fronts racinaires a été aisé en raison de l'absence de toute racine ancienne produite la végétation de la saison pluviale précédente. Ceci est à mettre en relation avec l'intense activité des termites dans ce sol : des galeries très nombreuses sont dans chacune des fosses, jusqu'à une profondeur de 1,50m. Dans ce champ, cultivé en sorgho par le programme d'écophysiologie en 2001 et 2003 et en arachide en 2002 et laissé en jachère 2004 et 2005, le recyclage de l'ensemble de la matière organique y compris racinaire est donc réalisé par les termites au cours du cycle annuel. Leur présence en profondeur pourrait éventuellement provoquer un déplacement minéral descendant.

Les observations de 2006 ont confirmé celles de 2005 sur le maïs et le sorgho et montré que les racines de mil suivent les mêmes règles : 1) les racines de 2 plantes contiguës s'évitent clairement et modifient leur trajectoire dès qu'elles s'approchent l'une de l'autre. Par conséquent le volume de sol colonisé par chaque plante est individualisé, exempt de racine appartenant à une autre plante. 2) A l'espacement de 20 cm, les racines croissant dans l'axe du rang arrivent en confrontation avec les racines des plantes contiguës peu de temps après la germination et se contrôlent mutuellement pour se diriger vers l'espace encore libre dans l'entre-rang. Chaque plante privilégie alors 2 racines horizontales principales croissant en directions opposées dans les 2 entre-rangs, plus ou moins perpendiculairement à l'axe du rang. La croissance horizontale de ces deux racines principales s'arrête lorsqu'elles arrivent en confrontation avec les racines des plantes des rangs adjacents. Ces racines atteignent une longueur supérieure à celle de la moitié de l'entre-rang et se partagent par conséquent l'espace du champ en un damier constitué de losanges très allongés. 3) Dans le même temps les racines colonisent la profondeur du sol. Les racines situées à l'aplomb de la plante conservent leur avance initiale et constituent le front racinaire vertical jusqu'à la fin du cycle de croissance. Ce comportement indique une vitesse de croissance verticale homogène de toutes les racines.

2.4.1. Le front racinaire horizontal

A la densité utilisée, chaque plante a développé 2 racines principales opposées pour conquérir la surface de l'inter-rang. Les vitesses de croissance et les longueurs finales de ces racines ont été très homogènes. Ces vitesses horizontales ont été inférieures à celles du front vertical et égales à 1,8 cm/jour pour le maïs et le mil, respectivement et significativement moindre pour le sorgho, 1,5 cm/jour (Fig. 6 et tableau 9). Les ordres de grandeur de 2005 sont donc confirmés mais le classement entre le sorgho et le maïs est inversé d'une année à l'autre. Pour les trois espèces, ces racines ont atteint une longueur moyenne de 65 cm avant d'arrêter leur croissance horizontale, dépassant par conséquent largement le milieu de l'inter-rang, situé à 37.5 cm des plantes. En 2006, il n'a pas été observé de corrélation entre les dates de fin de croissance horizontale des racines et celles du début de la montaison.

2.4.2. Le front racinaire vertical

La première notation a été effectuée 2 semaines après la levée. A partir de cette date les fronts racinaires du maïs et du sorgho sont descendus à une vitesse uniforme de 2,4 cm/jour tandis que celui du mil est descendu plus rapidement au départ (3,6 cm/jour) pour ralentir après 643 °C.j, après le début de la montaison, à 2,7 cm/jour (Fig. 4 et tableau 9). Par conséquent la

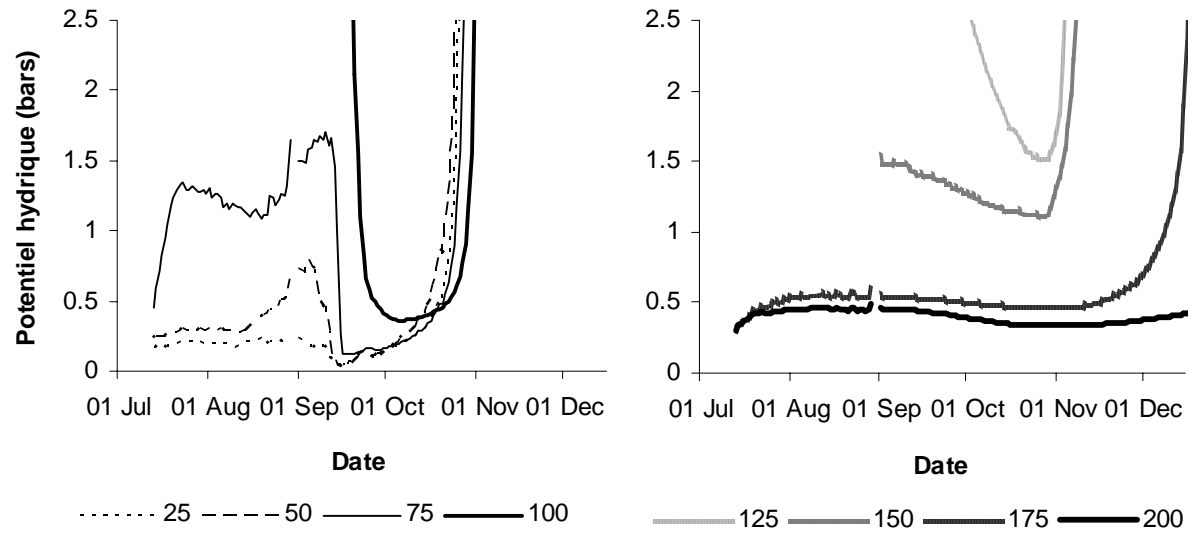


Fig. 7 : Evolution quotidienne du potentiel hydrique du sol mesuré chaque 25 cm de 25 à 200 cm de profondeur.

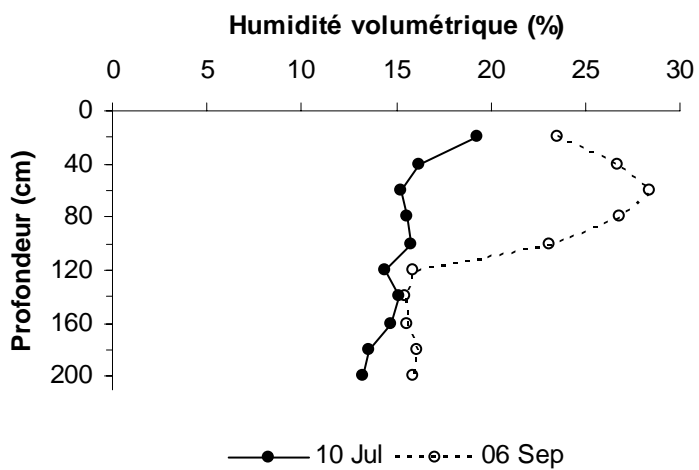


Fig. 8 : Mesures d'humidité volumétrique du sol lors de l'installation des capteurs et 2 mois plus tard

phase d'arrêt du front racinaire vertical observée en 2005 chez le maïs n'avait pas de valeur générale.

Enfin, il est apparu que le front racinaire vertical a continué de progresser jusqu'à la maturité chez les 2 espèces, en opposition avec les observations et modèles antérieurs, qui font état d'un arrêt de sa progression lors de la floraison.

2.4.3. Le front d'humectation

Les capteurs d'humidité du sol, reçus tardivement, ont été installés le 12 juillet dans une parcelle de sorghos du programme de sélection portant des variétés de même architecture et même durée de cycle que la variété CSM 335. Leur installation dans la parcelle des essais d'écophysiologie n'est plus possible pour des raisons de sécurité du matériel. Les sondes placées à 100, 125 et 150 cm ont été initialement mal branchées et n'ont fourni des données qu'après le 1^{er} Septembre. Au moment de l'installation le sol autour des capteurs d'humidité est saturé d'humidité et il est supposé se mettre ensuite en équilibre avec le terrain environnant. Dix jours ont été nécessaires pour parvenir à cet équilibre autour de la sonde à 75 cm et il semble qu'il n'y ait eu aucun échange d'humidité autour des sondes placées à 175 et 200 cm qui ont indiquées un sol proche de la saturation pendant toute la saison de culture, en contradiction avec les données recueillies par pesées d'échantillons en juillet et en septembre (Fig. 7 et 8).

Les données des capteurs d'humidité montrent qu'à la mi-juillet l'humidité n'avait pénétré dans le sol que sur un demi-mètre et que cette situation s'est maintenue pendant 2 mois, jusqu'au 10 Septembre. Et même, pendant la deuxième quinzaine du mois d'août, le remplissage de l'horizon 50 cm a été légèrement déficitaire par rapport aux prélèvements. A partir du 10 Septembre, la situation a radicalement évoluée : la pluie de 55mm de cette journée qui intervenait après une série très régulière de pluies de 10 à 20 mm, s'est fortement infiltrée, provoquant la saturation des horizons 25 et 50 cm et le remplissage de l'horizon 75 cm. Le remplissage des horizons 100 et 125 cm a enfin été assuré après les pluies des 22, 23 et 24 Septembre qui totalisaient 60 mm. L'horizon 150 cm semble ne pas avoir été rechargé au cours de cette saison 2006.

Les mesures directes d'humidité du sol, réalisées le 10 juillet sur le site d'installation des capteurs d'humidité et le 6 Septembre dans une fosse de suivi racinaire sur la parcelle des essais de physiologie, corroborent les données des capteurs d'humidité : 1) le front d'humectation ne descendait pas en dessous de 50 cm au 10 juillet. 2) le 6 Septembre, il atteignait l'horizon 100 cm dans la parcelle 'physiologie', contre moins de 75 cm dans la parcelle 'sélection'. En dépit de cette légère différence entre les parcelles, la conclusion est que la descente du front d'humectation a été très lente ou même quasi-nulle entre le 10 juillet et le 10 Septembre. Pendant cette période 450 mm d'eau ont été reçus, tandis que l'évapotranspiration a été de l'ordre de 300 mm, à raison de 5 mm par jour (plus faible au départ et plus forte en final). Par conséquent de l'ordre de 150 mm ou 30 % de l'eau pluviale a été perdue par ruissellement pendant cette période.

Ces mesures permettent à présent de répondre à la question restée pendante en 2005 sur l'interaction entre les vitesses de descente des fronts racinaire et d'humectation. La mesure du 6 Septembre montre que le front d'humectation n'était parvenu qu'à une profondeur de 1m tandis qu'à cette date, correspondant à 1000 °C.j, les fronts racinaires du maïs et du sorgho avaient atteint 1,75 m et celui du mil, 2,00 m. Par conséquent les racines pionnières croissent dans des horizons secs en avant du front d'humectation et sans relation directe avec sa progression.

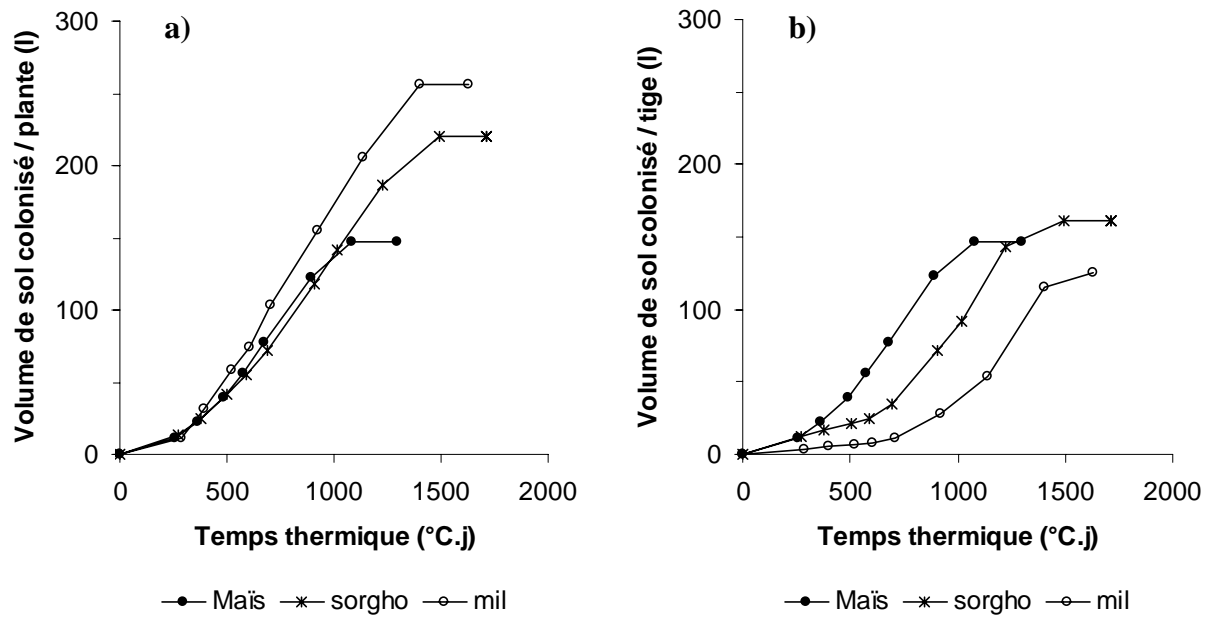


Fig. 9 : Volumes racinaires estimés au cours du cycle de développement des 2 espèces, **a)** pour chaque plante et **b)** rapporté à chaque tige. La période de la montaison est indiquée par une ligne de jonction entre points en gras.

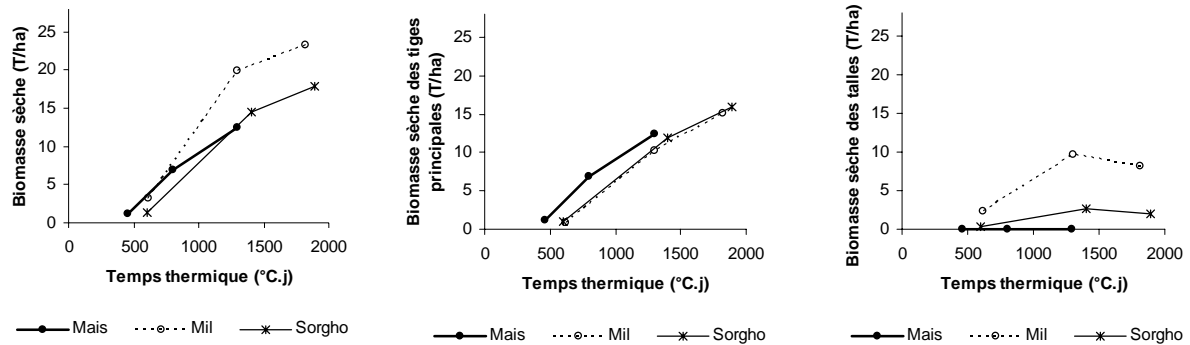


Fig. 10 : Evolution comparée de **a)** la biomasse totale, **b)** la biomasse des tiges principales et **c)** la biomasse des tiges mesurées au début de la montaison, à floraison et à la maturité du grain.

De même le ralentissement du front racinaire vertical du mil, après 643 °C.j (le 14 août) et à une profondeur de 1,40 m, n'a pas de relation directe avec le front d'humectation qui se trouvait à une profondeur inférieure à 1,00 m à cette période.

Enfin le suivi des capteurs d'humidité fournit des indications sur la dynamique de l'utilisation des réserves hydriques pendant la phase de remplissage du grain. La dernière pluie significative, de 10 mm est tombée le 2 Octobre, quelques jours après la floraison des sorghos. Ensuite le sorgho a prélevé de l'eau dans l'ensemble des horizons de 25 à 100 cm qu'il a épuisé quasi-simultanément, entre le 25 et le 30 Octobre. Le peu d'eau disponible dans les horizons 125 et 150 cm a alors été utilisé à son tour et épuisé le 3 et le 6 Novembre. Les grains de sorgho étaient alors arrivés à maturité. Ces données montrent que la culture conduite dans la parcelle de sélection a totalement épuisé les réserves disponibles pendant la phase de remplissage et ne disposait d'aucune marge.

2.4.4. L'estimation du volume colonisé par les racines

Sur la base de ces observations et après calcul des vitesses des fronts racinaires horizontaux et verticaux, il est possible d'estimer l'extension au cours du temps du volume de sol colonisé par les racines d'une plante sur la base de l'hypothèse d'une croissance en biseau dans le plan horizontal comme dans le plan vertical développée dans le rapport de 2005 (Fig. 9a).

Cette estimation montre que dans ces conditions de culture (67 000 pl/ha, 1 plante par poquet), après 500 °C.j et par conséquent le début de la montaison, les plantes de mil ont eu accès à des volumes de sol supérieurs à ceux des plantes de maïs ou de sorgho de même âge. Il faut cependant se souvenir que la croissance rapide en hauteur, et par conséquent en masse, du maïs a commencé avant nettement avant celles des 2 autres espèces. Mais que chez celles-ci plusieurs talles accompagnaient la croissance de la tige principale de chaque plante et se partageait par conséquent les ressources acquises dans le sol via les racines. Lorsque le volume racinaire est divisé par le nombre de tiges de la plante, il apparaît que le volume moyen disponible pour chaque tige pendant la montaison a été supérieur chez le maïs et le sorgho comparé avec le mil dont la montaison a débuté en même temps que celle du sorgho. Mais en final, pendant le remplissage du grain, après la phase de réduction du nombre de talles, les volumes racinaires par tige ont été voisins chez les trois espèces, de l'ordre de 150 l par tige (Fig. 9b).

2.5. L'accumulation de la biomasse

La biomasse a été mesurée aux trois phases clés, début de la montaison, floraison et maturité du grain, entre lesquelles sa croissance est linéaire. Pour les trois espèces la montaison a été la période de croissance maximale de la biomasse par unité de temps (Fig. 10a). La montaison a débuté 100 °C.j plus tôt chez le maïs en relation avec l'initiation paniculaire beaucoup plus précoce (Tableau 6). Pendant la montaison, la pente de la croissance en biomasse totale a été supérieure chez le mil à celle du sorgho puis du maïs. Mais les pentes de la croissance en biomasse des tiges principales ont proches chez les 3 espèces, ainsi que le laissait attendre les pentes très proches pour la croissance en hauteur (Fig. 10b et 4). Les vitesses d'allongement des entre-nœuds ont donc été proches chez les 3 espèces ce qui induit des vitesses de croissance en biomasse proches puisque la biomasse des tiges représente 70 à 80% de la biomasse aérienne pendant la montaison.

Pendant la phase suivant la floraison, pendant laquelle les grains se remplissent, la croissance en biomasse totale s'est fortement ralentie chez le mil et le sorgho, tandis qu'elle s'est

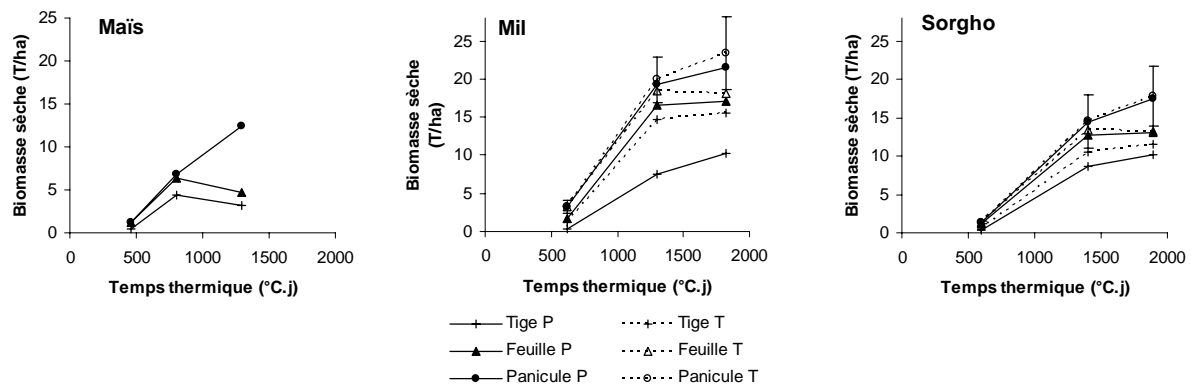


Fig. 11 : Mesure cumulée de la biomasse par organe et par tige de tige (P : tige principale, T : l'ensemble des talles) au début de la montaison, à floraison et à la maturité du grain. Les barres indiquent l'erreur standard sur la mesure de la biomasse totale.

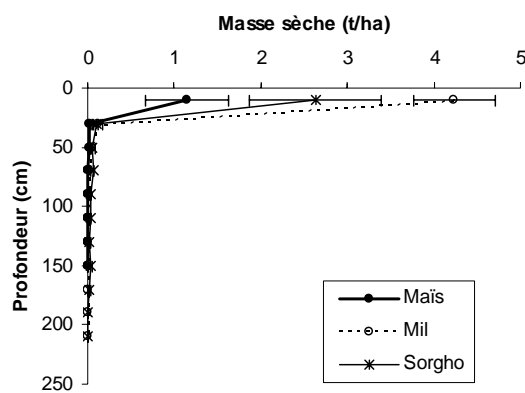


Fig. 12 : Biomasse racinaire par tranche de 20 cm de sol mesurée à la maturité du grain. Les barres indiquent l'erreur standard de la mesure.

poursuivie quasi au même rythme chez le maïs. Mais la croissance en biomasse des tiges principales des 3 espèces s'est poursuivie presque au même rythme chez les 3 espèces. Pendant cette phase, la biomasse des talles a diminué de 0,7 et 1,5 T/ha chez le sorgho et le mil respectivement (Fig. 10c). Chez le sorgho les talles n'ont pas produit de grain et on commencé à perdre une partie de leur biomasse (Fig. 11) tandis que chez le mil une partie des talles a continué de disparaître pendant cette phase (Fig. 3). En conséquence pendant cette phase, la croissance la croissance en biomasse des plantes entières a été de 5.5, 3.1 et 3.5 t/ha pour le maïs, le mil et le sorgho respectivement, tandis que la croissance en biomasse des seules tiges principales était de 5.5, 4.9 et 4.0 t/ha. La réduction apparente de l'efficacité de la photosynthèse chez le mil et le sorgho pendant le remplissage des grains ne résulte donc pas d'une moindre efficacité de la biosynthèse des plantes ou au moins de leur tige principale. Elle apparaît au contraire comme un résultat négatif du tallage sur le rendement en grain et peut-être même sur le rendement en biomasse totale.

La masse des tiges principales de maïs a diminué pendant le remplissage des grains, peut-être en raison de la translocation vers les grains, tandis qu'elle a continué d'augmenter chez le mil et le sorgho, absorbant une importante partie de la biomasse acquise par photosynthèse (Fig. 11). La stratégie d'utilisation de la biomasse après la floraison est donc fondamentalement différente entre le maïs d'une part et le mil et le sorgho d'autre part. Chez le maïs toute la biomasse nouvellement synthétisée et une part de la biomasse en réserve dans la tige est alors dirigée vers l'épi tandis que chez le sorgho et le mil la masse de la tige principale continue d'augmenter, de même que celui des racines nodales. Chez ces deux céréales, la panicule en cours de croissance n'utilise donc que d'une partie de la biomasse nouvellement synthétisée qui suffit à assurer son remplissage, tandis que la plante assure la solidité et l'ancrage de la tige de 4 m de haut, grâce à la lignification de sa base et à la production continue de nouvelles racines nodales. C'est pourquoi les variétés traditionnelles de mil et de sorgho d'Afrique de l'Ouest sont fortement « Stay-Green » et conservent même des capacités de plantes pérennes : elles repoussent après récolte lorsqu'elles sont irriguées. Cela assure le maintien très solide des tiges très hautes qui versent peu et ne cassent jamais alors qu'à l'inverse les tiges de maïs se fragilisent pendant le remplissage du grain et sont très susceptibles à la verse et à la casse en fin de cycle.

Les biomasses racinaires mesurées à la maturité des plantes sont importantes (1,2, 3,0 et 4.4 T/ha pour le maïs, le sorgho et le mil, respectivement) et différentes entre espèces (Fig. 12). Ces masses incluent le collet des plantes et les racines nodales qui ne sont pas récoltées par les paysans et sont par conséquent recyclées dans le champ. Ces masses représentent respectivement 10, 17 et 19 % de la biomasse aérienne. La biomasse investie dans l'appareil racinaire est donc beaucoup plus importante chez le mil et le sorgho que chez le maïs. Il s'agit avant tout d'un investissement dans la fonction d'ancrage par production de très nombreuses et fortes racines adventives, nécessaires au maintien des tiges très hautes.

La répartition dans le sol des racines de sorgho a été différente de celle des 2 autres cultures. La proportion de la masse de racines dans l'horizon 0-40 cm a été de 98.6, 98.0 et 91.7 % chez le maïs, le mil et le sorgho respectivement. Chez le sorgho, 4 % de la masse racinaire s'est répartie uniformément dans l'horizon 40-80 cm et les 4% restant dans l'horizon 80-180 cm, tandis que les masses racinaires devenaient négligeables en dessous de 80 cm pour le maïs et de 120 cm pour le mil.

Rendements d'hybrides de sorgho à différentes densités

Résumé

Les nouveaux hybrides de sorgho de race guinea produits par le programme de sélection de l'ICRISAT-Mali, ont montré lors des premiers tests un potentiel de rendement en grain nettement supérieur à celui des témoins de référence et de leurs parents, associé à une taille plus importante de leur panicule et à un tallage important. Cinq hybrides parmi les plus prometteurs ont été testés à trois densités, entre 67 et 200 000 plantes/ha, et avec un niveau de fertilisation élevé afin de déterminer leur potentiel maximal de rendement et leur réaction à la densité. Les rendements en grain et en biomasse ont été inférieurs à ceux de 2005, invariants aux densités basses et intermédiaires, plus faibles à la densité supérieure pour le témoin CSM 335 et deux des hybrides. L'hybride FambéA x CGM 19 a été l'hybride le plus productif. Le tallage n'a pas participé au rendement pour les deux densités supérieures et n'a pas été un facteur positif de rendement à la densité inférieure. Les hybrides de parent IPS0001A ou Séguétana ont été plus sensibles que les autres à l'augmentation de la densité pour la vitesse d'apparition des feuilles, la vitesse de croissance en hauteur et finalement les rendements.

Objectif de l'essai

Lors des premiers tests les nouveaux hybrides de sorgho ont montré un potentiel de rendement en grain nettement supérieur à celui des témoins de référence et de leurs parents, associé à une taille plus importante de leur panicule et à un tallage important. Ces deux derniers caractères dépendent fortement de la densité de culture qui est l'un des facteurs de l'intensification. Cet essai avait donc pour objet de tester la réponse à la densité de quelques-uns des hybrides de sorgho les plus prometteurs.

Matériel et méthodes

L'essai a été semé à la station de Samanko, Mali (12°32N, 8°04W). Le terrain a d'abord été labouré, puis 100 kg de plâtre + 200 kg de NPK (6-10-20) ont été successivement épandus et enfouis mécaniquement. Des billons distants de 0.75 m ont été tracés. Le semis manuel a été effectué à 5 grains/poquet, avec une distance de 0,20 m entre poquet. Le démariage a été effectué 2 semaines après la levée à 1, 2 ou 3 pl/poquet suivant les parcelles afin d'assurer des densités de 67, 133 ou 200 000 pl/ha. Les dates des principales opérations culturales sont reportées dans le tableau 1. Les sarclages et les apports d'engrais étaient effectués simultanément. Un mois après la levée 100 kg/ha d'urée + 200 kg/ha de NPK ont été apportés, puis 100 kg/ha d'urée 4 semaines plus tard.

Tableau 1: Dates des principales opérations culturales

Semis	Levée	Démariage	Urée + TSP	Urée 2	Récolte
27 juin	2 juil.	14 juil.	24 juil.	17 août	10 nov.

L'essai comportait 3 hybrides intervariétaux basés sur la ligne mâle stérile FambéA dont les descendance ont montré des dates de floraison adaptées à la région croisée avec 3 variétés (CGM 19, CSM 388, Seguetana CZ24/25), 2 hybrides issus du croisement entre IPS0001A et 2 variétés (CSM 388 et Seguetana) et un témoin local, CSM 335.

Chaque variété était testée à trois densités de culture, 67, 133 et 200 000 pl/ha, dans un dispositif split-plot en blocs à 3 répétitions avec la densité en sous-blocs. Les parcelles élémentaires comportaient 4 lignes de 5 m de long.

Les dates des stades feuille-drapeau, floraison et maturité ont été enregistrées par parcelle comme la date à laquelle 50% des plantes d'une des lignes de la parcelle avaient atteint le stade concerné (feuille-drapeau déployée, floraison de la moitié de la panicule et point noir sur les grains de la base de la panicule qui sont les derniers à franchir ce stade).

La phénologie et la croissance végétative ont été mesurées chaque semaine de façon non-destructive sur une placette de 10 plantes dans chaque parcelle, repérées de 1 à 10 (Feuilles apparues, hauteur de plante, nombre de talles). La récolte des placettes de 10 plantes a finalement été effectuée ainsi que celles des 2 lignes intérieures de chaque parcelle. Les organes ont été séparés puis mis à sécher afin de déterminer les masses sèches de tige, feuille, axes de la panicule et grain pour la tige principale et pour les talles, ainsi que la longueur, le nombre de nœuds et de branches des panicules des tiges principales.

Les données météorologiques étaient enregistrées automatiquement (Centrale Campbell 21X) au pas de temps horaire dans le parc météo de la station de Samanko, à 500 m de la parcelle.

L'ensemble des données a été traité à l'aide du logiciel SAS¹. En particulier de nombreuses régressions non-linéaires de la croissance sur le temps thermique ont été effectuées, sur la base du modèle bilinéaire suivant :

$$A = \min(\text{Somme_T}, \text{seuil1})$$

$$B = \min(\text{seuil2} - \text{seuil1}, \max(0, \text{Somme_T} - \text{seuil1}))$$

$$\text{Observation} = b_0 + b_1 * A + b_2 * B$$

avec Somme_T : le temps thermique ; seuil1 et seuil2 : le temps thermique aux points d'inflexion du modèle ; b0, b1 et b2 les coefficients de la régression.

La surface des feuilles a été estimée à partir de la longueur et de la largeur maximale du limbe à l'aide du coefficient calculé précédemment pour le sorgho :

$$S = L \times l \times 0.72$$

¹ SAS. 2004. Version 9.1. Cary, NC (USA), SAS Institute Inc.

Tableau 2 : Dates d'exertion de la feuille-drapeau et de floraison

Densité (pl/ha)	Feuille-drapeau			Floraison		
	67000	133000	200000	67000	133000	200000
CSM335	17 Sep	16 Sep	17 Sep	29 Sep	28 Sep	29 Sep
FambeAxCGM19	11 Sep	12 Sep	11 Sep	23 Sep	24 Sep	24 Sep
FambeAxCSM388	14 Sep	13 Sep	13 Sep	26 Sep	25 Sep	24 Sep
FambeAxSeguetanaCZ24/25	11 Sep	11 Sep	11 Sep	22 Sep	22 Sep	23 Sep
IPS0001AxCSM388	13 Sep	14 Sep	13 Sep	25 Sep	27 Sep	25 Sep
IPS0001AxSeguetanaCZ24/25	13 Sep	14 Sep	13 Sep	24 Sep	25 Sep	25 Sep

Tableau 3 : Rendements et composantes du rendement

Variété	Densité au semis (pl/ha)	Densité de tiges finale (tiges/ha)	Biomasse totale (t/ha)	Rendement en grain (t/ha)	Indice de récolte (%)	Tallage (talle/plante)	Poids de grain par panicule (g)	Nombre de grains par panicule	Poids d'un grain (mg)
CSM335	67000	70171	15.7	2.7	17.2	0.2	37	1948	19
	133000	113248	15.6	2.9	18.6	0	28	1422	19
	200000	139316	13.5	1.9	14.2	0	13	716	18
FambeAxCGM19	67000	74103	16.4	3.6	21.7	0.1	52	2596	20
	133000	114103	18.0	3.9	21.4	0	32	1633	19
	200000	158120	17.9	3.4	19.1	0	25	1304	19
FambeAxCSM388	67000	64957	17.2	3.2	18.2	0	48	2353	20
	133000	116239	19.8	3.6	18.4	0	29	1523	19
	200000	144017	18.2	3.0	16.4	0	19	1004	19
FambeAxSeguetanaCZ24/25	67000	88803	15.3	2.7	17.4	0.4	45	2242	20
	133000	105983	15.4	2.5	15.9	0	27	1369	19
	200000	136752	11.8	1.5	12.9	0	12	675	18
IPS0001AxCSM388	67000	72222	18.5	3.5	19.1	0.1	53	2559	21
	133000	110684	19.2	3.4	17.3	0	30	1486	20
	200000	153419	19.0	3.4	17.9	0	21	1079	20
IPS0001AxSeguetanaCZ24/25	67000	109915	15.8	2.3	13.5	0.8	36	1986	17
	133000	112393	13.9	1.2	9.0	0	12	692	17
	200000	135897	12.1	0.8	6.2	0	9	521	16
Moyenne			16.3	2.8	16.4	0.1	29	1506	19
Erreur standard			1.9	0.5	2.1	0.2	4	165	1
ppds			2.6	0.7	2.8	0.2	9	389	2
Facteurs de l'AOV									
Variété			***	***	***	*	***	***	***
Densité			ns	ns	ns	***	***	***	ns
Variété x densité			ns	ns	ns	*	ns	ns	ns

Résultats et discussions

1. Cycles et rendements

Les cinq hybrides ont eu des cycles très voisins, indépendants de la densité de semis (Tableau 1). Ils ont tous été un peu plus précoces que le témoin que le témoin CSM 335. FambéA x CGM 19 et FambéA x Séguétana ont été les plus précoces, 6 à 7 jours plus précoces que CSM 335. Les 3 autres hybrides ont eu les mêmes cycles, 3 jours plus longs que les 2 hybrides précédents.

La récolte de biomasse aérienne sèche a varié entre 11,8 et 19,2 t/ha, celle de grain sec entre 0,8 et 3,9 t/ha (Tableau 2). Pour ces deux données, comme pour l'ensemble des composantes du rendement à l'exception du tallage, les différences entre variétés ont été hautement significatives mais la variation de densité n'a pas entraîné de variation significative des paramètres mesurés. Pourtant l'augmentation de la densité a provoqué une baisse nette des moyennes de rendements et de leurs composantes chez 3 des variétés (CSM 335, FambéA x Séguétana et IPS0001A x Séguétana) mais la variabilité sur les mesures et l'utilisation d'un dispositif en split-plot n'a pas permis de mettre en évidence cet effet de la densité.

L'indice de récolte et le nombre de grains par panicule ont été significativement meilleurs chez l'hybride FambéA x CGM19 que chez le témoin CSM 335 et 3 des hybrides. Ils ont en revanche été significativement inférieurs à toutes les autres variétés chez l'hybride IPS001A x Séguétana. Cependant l'augmentation de l'indice de récolte de FambéA x CGM19 par rapport aux autres variétés n'est que de l'ordre de 3% et le meilleur indice de récolte n'a pas dépassé 21,7 %.

Les deux hybrides ayant Séguétana pour parent mâle ont conservé plus de talles que les autres variétés au moment de la récolte lorsqu'ils étaient cultivés à la densité inférieure. Chaque plante de ces hybrides portait alors en moyenne 0,4 et 0,8 talle en plus de la tige principale. Aux deux densités supérieures, aucune variété n'a conservé de talle au moment de la récolte.

Le poids des grains a été sensiblement égal chez 5 des variétés et significativement inférieur chez l'hybride IPS001A x Séguétana. En moyenne, il a légèrement diminué avec la densité.

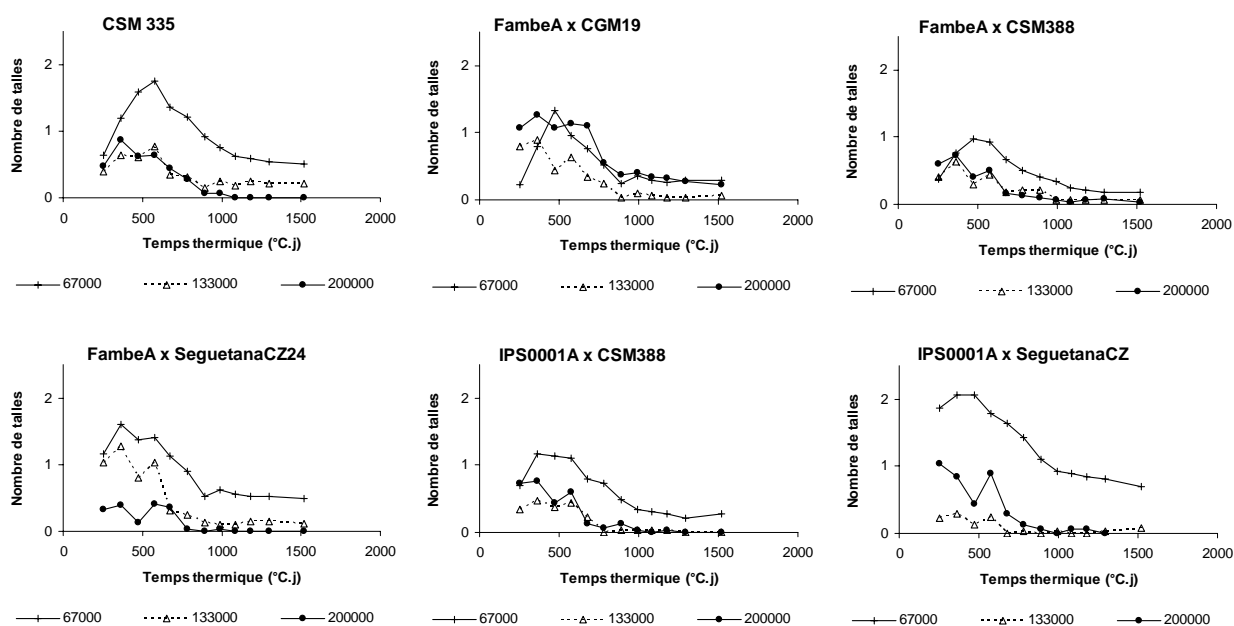


Fig. 1 : Evolution du nombre de talles moyen par plante en fonction de la densité.

2. L'évolution du tallage

Aux densités de culture pratiquées, aucune variété n'a produit en moyenne plus de 2 talles par plante, mais toutes ont produit quelques talles même à la densité la plus élevée (Fig. 1). Il faut noter que la variabilité inter-plante est très forte pour ce caractère. Les talles sont apparues avant le début de la montaison, à ± 500 °C.j (Tableau 5), et sont morts pour partie ou totalement pendant la montaison qui s'est achevée à ± 1200 °C.j. Le nombre de talles produits a diminué avec la densité de culture, nécessairement ressentie tôt par les plantes cultivées dans le même poquet aux densités supérieures.

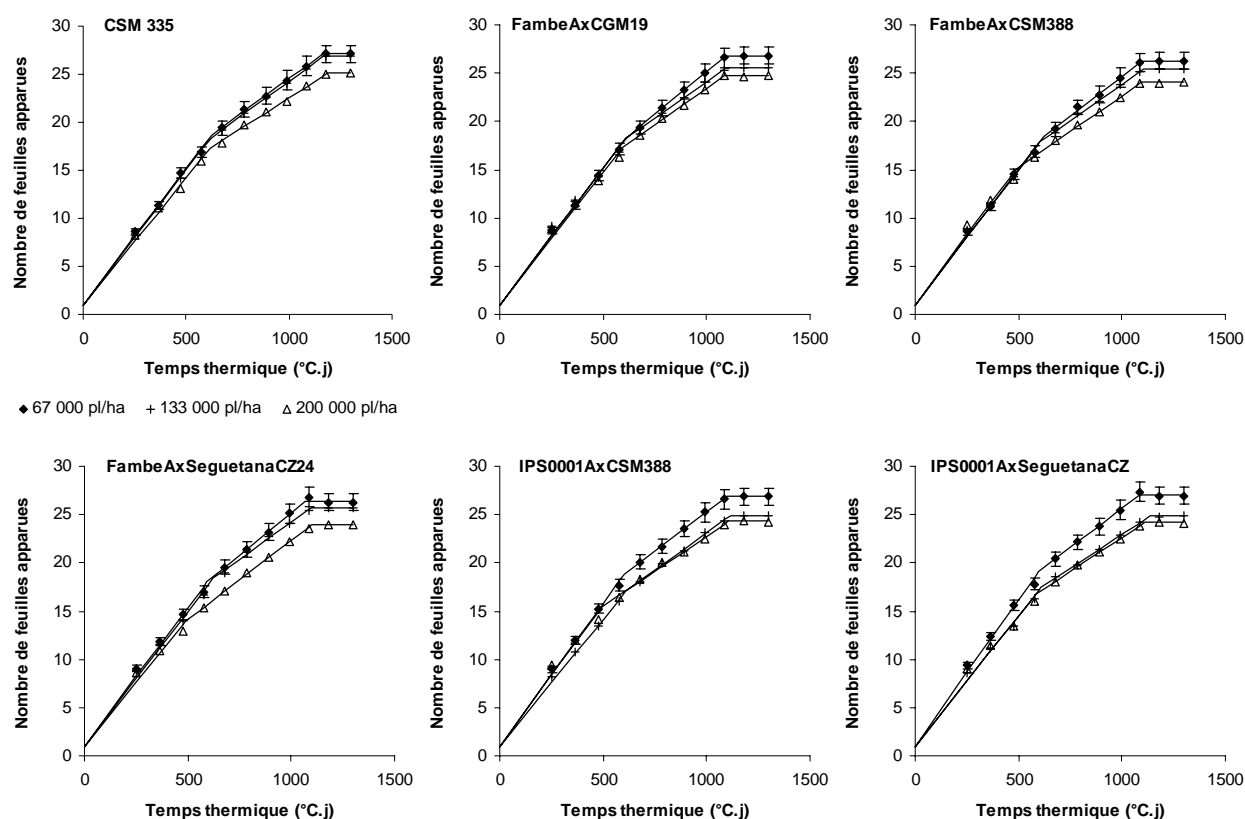


Fig. 2 : Cinétique d'apparition des feuilles en fonction de la densité. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation. Les barres indiquent l'intervalle de confiance des moyennes estimées pour la densité inférieure.

Tableau 4 : Valeurs des phyllochrones et des seuils aux points d'inflexion estimées par régression.

variété	Densité (pl/ha)	phyllochrone1 (°C.j.feuille-1)	Point d'inflexion (°C.j)	phyllochrone 2 (°C.j.feuille-1)	Feuille-drapeau (°C.j)
CSM335	67000	35 ± 1	623 ± 48	64 ± 8	1166 ± 41
CSM335	133000	36 ± 1	623 ± 42	65 ± 7	1169 ± 35
CSM335	200000	38 ± 1	616 ± 53	73 ± 9	1187 ± 52
FambeAxCGM19	67000	35 ± 1	606 ± 56	57 ± 6	1093 ± 30
FambeAxCGM19	133000	35 ± 1	607 ± 52	67 ± 9	1093 ± 40
FambeAxCGM19	200000	36 ± 1	594 ± 75	67 ± #	1084 ± 53
FambeAxCSM388	67000	36 ± 1	621 ± 51	61 ± 6	1094 ± 32
FambeAxCSM388	133000	36 ± 1	604 ± 53	66 ± 9	1103 ± 38
FambeAxCSM388	200000	35 ± 1	487 ± 46	68 ± 6	1093 ± 37
FambeAxSeguetana	67000	35 ± 1	592 ± 62	57 ± 8	1073 ± 38
FambeAxSeguetana	133000	36 ± 1	622 ± 53	65 ± 8	1096 ± 38
FambeAxSeguetana	200000	38 ± 1	489 ± 68	61 ± 6	1100 ± 39
IPS0001AxCSM388	67000	34 ± 1	601 ± 46	62 ± 7	1097 ± 33
IPS0001AxCSM388	133000	38 ± 1	610 ± 68	65 ± 9	1116 ± 43
IPS0001AxCSM388	200000	34 ± 1	493 ± 39	70 ± 6	1108 ± 34
IPS0001AxSeguetana	67000	33 ± 1	593 ± 37	61 ± 5	1084 ± 26
IPS0001AxSeguetana	133000	37 ± 1	609 ± 57	72 ± #	1135 ± 50
IPS0001AxSeguetana	200000	37 ± 1	580 ± 54	71 ± #	1111 ± 43

3. La vitesse d'apparition des feuilles

Les 6 variétés ont toutes émis 26-27 feuilles à la densité inférieure et ce nombre a diminué avec l'augmentation de la densité (Fig. 2). Chez les 6 variétés la cinétique d'apparition des feuilles a été bi-linéaire : après une première phase rapide jusqu'à l'exertion de la feuille 17-18, pendant laquelle le phyllochrone avait une valeur moyenne de $36^{\circ}\text{C.j.feuille}^{-1}$, la vitesse d'apparition des feuilles suivantes a fortement ralenti et le phyllochrone a pris une valeur moyenne de $65^{\circ}\text{C.j.feuille}^{-1}$ (Tableau 4).

Ce ralentissement s'est produit en moyenne à 607°C.j excepté pour les variétés FambéA x CSM 338, FambéA x Séguétana et IPS0001A x Séguétana cultivés à la densité de 200 000 pl/ha où elle est intervenu à 490°C.j . La période d'exertion des feuilles s'est achevée simultanément pour toutes les variétés et à toutes les densités à 1111°C.j .

Chez les 6 variétés la densité a eu pour effet de réduire la vitesse d'apparition des feuilles après le point d'inflexion mais avec des différences entre variétés. Chez CSM 335 et FambéA x Séguétana la vitesse de d'apparition et le nombre total de feuilles ont été réduits significativement que pour la plus haute densité. Chez FambéA x CGM19 et FambéA x CSM 388 la réduction de la vitesse et du nombre de feuilles ont été inversement proportionnels à l'augmentation de densité. Enfin, les 2 hybrides de parent femelle IPS0001A ont été affectés de manière identique par les densités moyennes et supérieures et de façon plus précoce puisque la vitesse d'apparition des feuilles était déjà réduite pendant la première phase, avant le point d'inflexion.

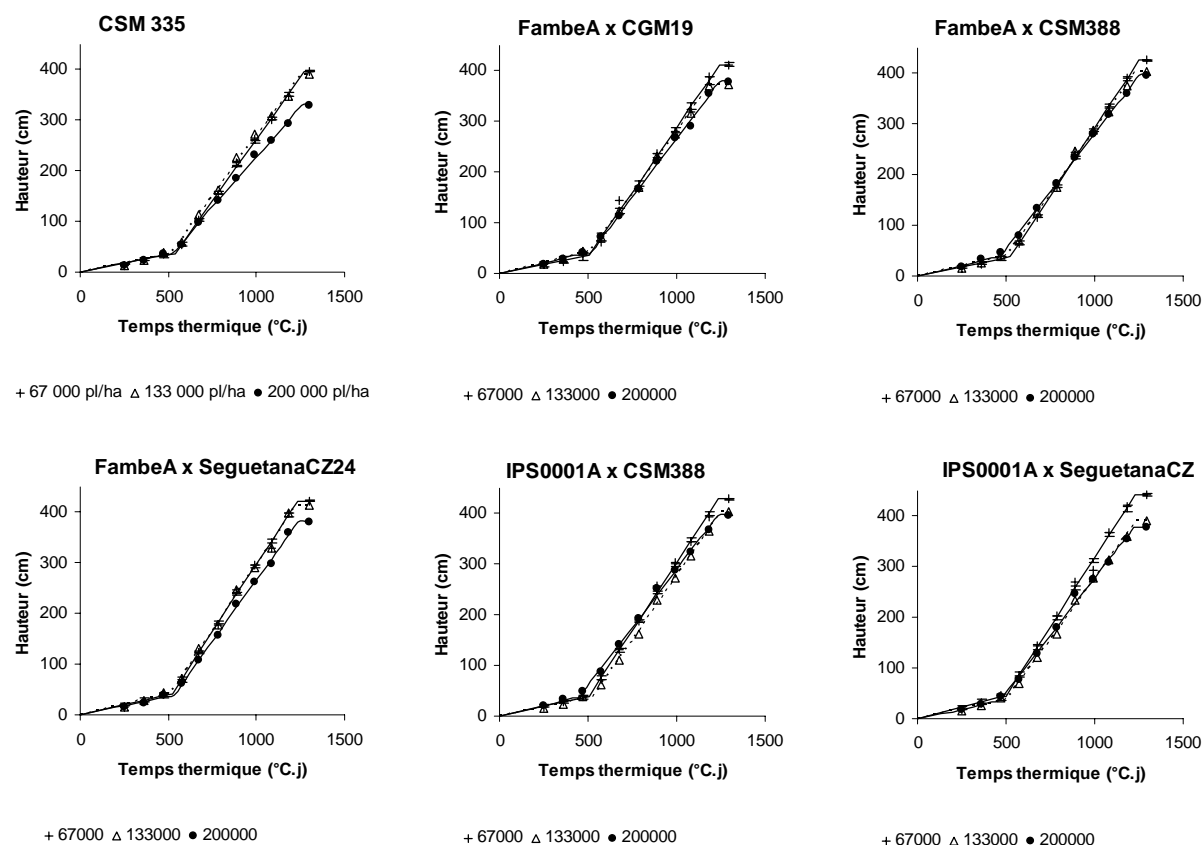


Fig. 3 : Cinétique de la croissance en hauteur des tiges principales en fonction de la densité. Les régressions ont été calculées à l'aide d'une procédure d'optimisation. Les barres indiquent l'intervalle de confiance des moyennes estimées pour la densité inférieure.

Tableau 5 : Valeurs des pentes et des seuils aux points d'inflexion de la cinétique de croissance en hauteur estimées par régression.

Variété	Densité (pl/ha)	b1 (cm.°C ⁻¹ .j ⁻¹)	Début montaison (°C.j)	b2 (cm.°C ⁻¹ .j ⁻¹)	Fin montaison (°C.j)
CSM335	67000	0.068 ± 0.007	538 ± 13	0.489 ± 0.009	1274 ± 8
CSM335	133000	0.071 ± 0.010	516 ± 18	0.480 ± 0.012	1254 ± 12
CSM335	200000	0.069 ± 0.007	521 ± 14	0.399 ± 0.008	1257 ± 9
FambeA x CGM19	67000	0.072 ± 0.017	506 ± 28	0.509 ± 0.020	1244 ± 18
FambeA x CGM19	133000	0.086 ± 0.006	517 ± 10	0.488 ± 0.007	1192 ± 5
FambeA x CGM19	200000	0.081 ± 0.009	513 ± 18	0.460 ± 0.011	1245 ± 11
FambeA x CSM388	67000	0.072 ± 0.008	524 ± 13	0.535 ± 0.010	1249 ± 8
FambeA x CSM388	133000	0.081 ± 0.011	509 ± 18	0.503 ± 0.013	1230 ± 11
FambeA x CSM388	200000	0.084 ± 0.009	469 ± 13	0.455 ± 0.006	1251 ± 7
FambeA x Seguetana	67000	0.080 ± 0.010	524 ± 16	0.537 ± 0.012	1233 ± 10
FambeA x Seguetana	133000	0.083 ± 0.010	514 ± 17	0.522 ± 0.012	1225 ± 10
FambeA x Seguetana	200000	0.073 ± 0.008	533 ± 13	0.486 ± 0.009	1233 ± 8
IPS0001A x CSM388	67000	0.078 ± 0.009	505 ± 14	0.534 ± 0.010	1234 ± 8
IPS0001A x CSM388	133000	0.074 ± 0.006	529 ± 9	0.505 ± 0.007	1252 ± 6
IPS0001A x CSM388	200000	0.086 ± 0.015	453 ± 22	0.458 ± 0.010	1234 ± 11
IPS0001A x Seguetana	67000	0.090 ± 0.014	497 ± 23	0.543 ± 0.017	1231 ± 14
IPS0001A x Seguetana	133000	0.077 ± 0.009	507 ± 15	0.483 ± 0.010	1237 ± 9
IPS0001A x Seguetana	200000	0.076 ± 0.020	462 ± 29	0.451 ± 0.013	1222 ± 14

4. La vitesse de croissance en hauteur

La vitesse de croissance en hauteur a été égale pour les 6 variétés pendant la première phase, jusqu'au début de la montaison (Fig. 3, tableau 5). La montaison a débuté en moyenne à 517 °C.j sauf pour les variétés FambéA x CSM 338, IPS001A x CSM 388 et IPS0001A x Séguétana cultivés à la densité de 200 000 pl/ha où elle a débuté environ 5 jours plus tôt à ± 460 °C.j. La montaison a donc commencé en moyenne 80°C.j, soit 5 jours, avant que ne se produise le ralentissement de la vitesse d'apparition et 30°C.j ou 2 jours chez les hybrides plus précoces à haute densité. Pendant la montaison la vitesse de croissance en hauteur a été significativement différente entre variétés et entre traitements. La montaison des hybrides a été plus rapide que celle de CSM 335, en particulier celle de FambéA x Séguétana. Mais les hauteurs finales ont été similaires parce que la montaison s'est achevée en moyenne deux jours plus tôt chez les hybrides que chez CSM 335 (1234 contre 1262 °C.j).

La vitesse de croissance en hauteur a été plus lente dans les parcelles à plus haute densité. Comme pour les vitesses d'apparition des feuilles, CSM 335 et FambéA x Séguétana la vitesse de croissance en hauteur n'a été réduite significativement que pour la plus haute densité. Chez FambéA x CGM19 et FambéA x CSM 388 la réduction de vitesse a été moindre et inversement proportionnelle à l'augmentation de densité. Enfin, les 2 hybrides de parent femelle IPS0001A ont été affectés de manière identique par les densités moyennes et supérieures.

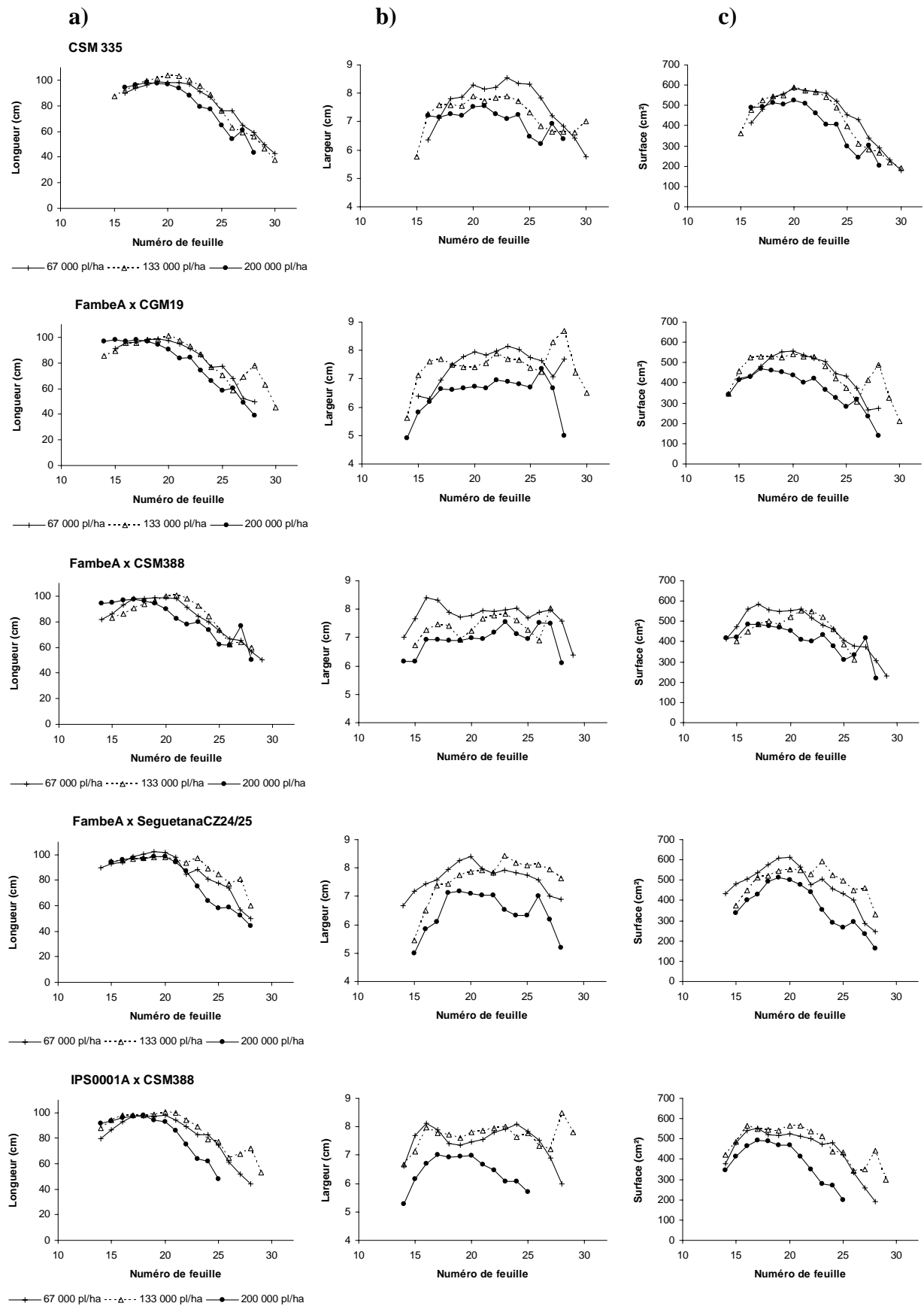


Fig. 4 : Longueur (a) et largeur (b) moyennes des limbes foliaires des tiges principales et estimation (c) de leur surface en fonction de la densité de culture.

5. Les dimensions des feuilles

Les mesures de longueur et de largeur des limbes foliaires effectuées sur les feuilles de rang supérieur à 15 n'ont montré de différence claire entre variétés (Fig. 4). Pour les 6 variétés, la longueur maximale des feuilles a été voisine de 1 m et la largeur maximale a été de l'ordre de 8 cm et a peut-être été un peu supérieure chez CSM 335.

La réaction à la densité déjà montrée en 2003 est confirmée. L'augmentation de la densité n'a pas eu d'effet sur la longueur maximale des feuilles, mais elle a décalé les courbes vers la gauche parce qu'à haute densité la longueur maximale est atteinte par des feuilles de rang légèrement inférieur et que la plante produit moins de feuilles (Fig. 4a). En revanche, l'augmentation de la densité a pour effet de réduire la largeur maximale des plus grandes feuilles de la plante ce qui affecte proportionnellement leur surface (Fig 4b et c).

Par conséquent la surface foliaire émise par les tiges principales des plantes cultivées à haute densité est inférieure à celle des plantes à faible densité.

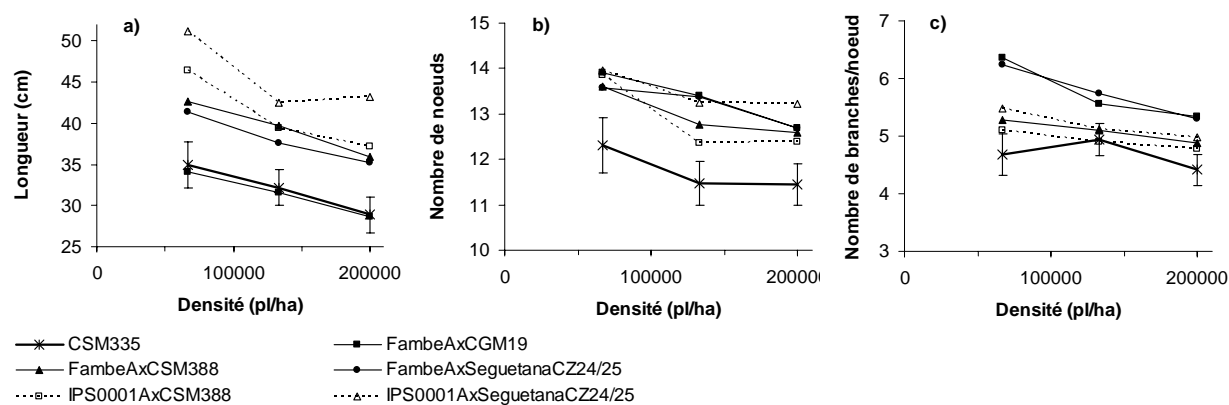


Fig. 5 : Relation entre la densité de culture et les caractéristiques moyennes des panicules : **a)** longueur, **b)** le nombre de nœuds et **c)** le nombre moyen de ramifications portées par chaque nœud. Les barres indiquent l'intervalle de confiance des moyennes estimées pour le témoin CSM 335.

Tableau 6 : Résultats du test F sur les facteurs contrôlés de l'analyse de la variance des caractéristiques paniculaires.

	Longueur	Nombre de nœuds	Nombre de branches/nœud
Variété	***	***	***
Densité	***	***	***
Variété x densité	ns	ns	**

6. Les dimensions des panicules

La longueur des panicules a été significativement différente entre variétés et entre densités (Fig. 5a et tableau 6). Quatre des cinq hybrides ont eu des panicules plus longues que celles de CSM 335 et de FambéA x CGM19. La longueur des panicules a diminué avec l'augmentation de la densité.

Le nombre de nœuds paniculaires a été significativement supérieur chez les 5 hybrides à celui des panicules du témoin CSM 335 (Fig. 5b). Il a significativement diminué avec l'augmentation de la densité.

Enfin le nombre moyen de ramifications portées par chaque nœud paniculaire a été significativement supérieur chez les hybrides FambéA x CGM19 et FambéA x Séguétana à ceux des autres variétés pour une culture à la densité inférieure (Fig. 5c).

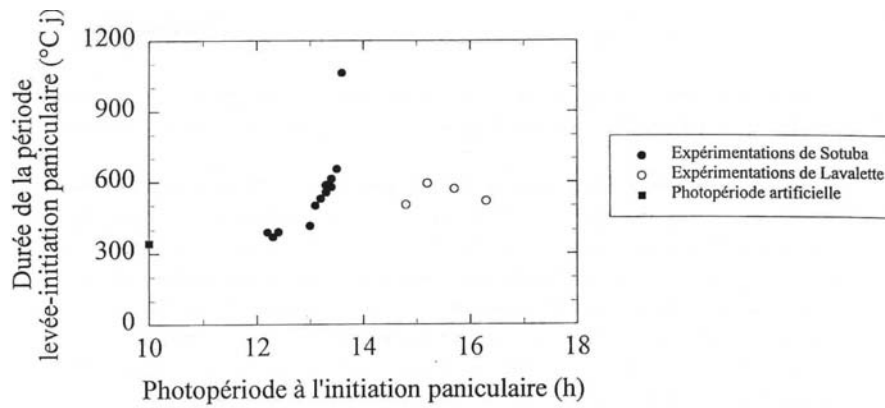


Fig. 1 : Relation entre la durée de la phase levée-initiation paniculaire et la photopériode au moment de l'initiation paniculaire chez la variété E 35-1 cultivée à Bamako (symboles fermés) et à Montpellier (symbole ouvert). Lafarge 1998.

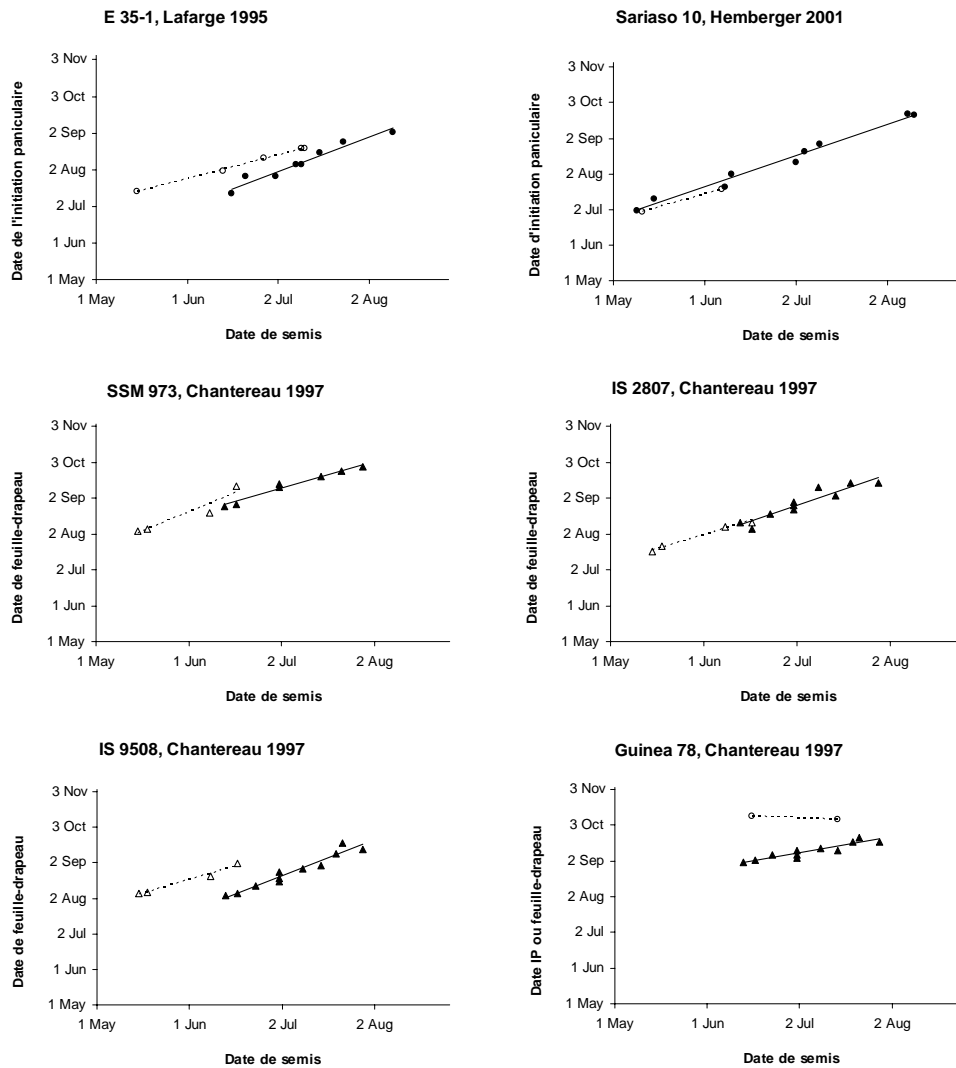


Fig. 2: Dates de l'initiation paniculaire (●) ou de l'exertion de la feuille-drapeau (▲) de 6 variétés semées entre les mois d'Avril et d'Août à Bamako (symboles pleins) ou à Montpellier (symboles ouverts).

Dates d'initiation paniculaire à Bamako et à Montpellier

Résumé

Le sorgho et le mil sont classés comme plantes de jours courts, fleurissant plus rapidement lorsque la photopériode est courte. Par conséquent elles devraient fleurir très tardivement lorsqu'elles sont cultivées pendant l'été aux latitudes tempérées, puisque les jours y sont alors très longs. Quelques observations antérieures de variétés de sorgho tropicales cultivées à Bamako (Mali) et Montpellier (France) ont montré que ce n'est pas le cas et que des variétés à photopériodisme modéré semées au même moment fleurissaient à des dates voisines aux 2 latitudes. En conséquence, 5 variétés de sorgho et 5 variétés de mil tropicaux, choisies pour couvrir toute la gamme des sensibilités à la photopériode ont été semées en Mai, Juin et Juillet sur les deux sites, afin de préciser l'effet de la latitude sur la durée de leur phase végétative et sur leur vitesse de développement. Chez le mil l'initiation paniculaire a toujours été un peu plus tardive à Montpellier. La différence de latitude a modifié la date des initiations paniculaires de façon prononcée chez les variétés à photopériodisme moyen à fort. Les variétés non-photopériodiques ou très photopériodiques ont initié aux mêmes dates sur les deux sites. En revanche les vitesses de développement ont été identiques aux deux latitudes. Il n'est pas possible de formuler une hypothèse synthétique de l'effet de la latitude sur la réaction photopériodique sur la seule base de ces premiers résultats.

Introduction

Alors que la variation de la durée de la phase végétative des variétés de sorgho photopériodiques en réponse à la date de semis en un lieu a déjà fait l'objet de quelques travaux dont les résultats convergent, la réaction à la variation de la latitude reste peu étudiée. Il est présumé que l'effet de la latitude devrait se déduire de la variation de la durée du jour induite. En région tropicale on attend donc que les variétés photopériodiques fleurissent plus tard avec l'augmentation de latitude qui induit une augmentation de la durée des jours entre les deux équinoxes de printemps et d'automne. Ce présumé a été démenti et discuté par Curtis 1968¹ qui observait au contraire une grande stabilité des dates de floraison de sorghos semés entre 7 et 11°N. Il supposerait par ailleurs des floraisons toujours rapides aux latitudes équatoriales, contraire aux observations de Doré 1959² sur le riz, à 2 et 6°N. Lafarge 1995³ a montré que la variété de sorgho E-35-1 atteignait l'initiation paniculaire sous des photopériodes très longues à Montpellier (44°N) après une phase végétative dont la durée n'était pas compatible avec la relation entre cette durée et la photopériode à l'initiation paniculaire observée à Bamako (12°N) (Fig. 1). En fait la relation entre la date d'initiation paniculaire et la date de semis chez cette variété était proche sur les deux sites (Fig 2). Des relations encore plus proches entre sites ont été observées chez des variétés précoces entre dates d'initiation chez Sariaso 10 (Hemberger, 2001⁴), et entre dates d'exertion de la feuille-drapeau chez SSM 973 et IS 2807 (J. Chantereau, données non publiées). En revanche la variété précoce IS 9508 était plus tardive à Montpellier qu'à Bamako et l'initiation

¹ Curtis, D. L. 1968. The relationship between the date of heading of Nigerian sorghums and the duration of growing season. J. Appl. Ecol. 5: 215-226.

² Doré, J. 1959. Response of rice to small differences in length of day. Nature 183: 413-414.

³ Lafarge, T. 1998. Analyse de la mise en place de la surface foliaire du sorgho-grain (*Sorghum bicolor* L. Moench) au champ. Orsay, France, Paris-Sud: 69 p.

⁴ Hemberger, J. 2001. Effets de la photopériode sur le plastochrone, le phyllochrone et la date d'initiation paniculaire de trois variétés de sorgho de race caudatum et guinea, Université de Corse: 22 p.

paniculaire de la variété tardive Guinea 78 intervenait à Montpellier après que la floraison ait été observée à Bamako.

L'expérience reportée ici avait pour objectif de comparer systématiquement les dates d'initiation paniculaire et les vitesses de développement observées à Bamako et à Montpellier de 5 variétés de sorgho et 5 variétés de mil choisies pour couvrir la plus large gamme possible de sensibilité à la photopériode.

Matériels et méthodes

	Sorgho	Mil
Non photopériodique	IRAT 204	GB 8735
↓	Sariaso 10	Souna
↓	IRAT 174	Badougou
↓	CSM 335	Kapelga
Très photopériodique	Souroukougou	Sanko

Ces dix variétés ont été caractérisées au cours d'expériences de semis mensuels conduites pendant deux années consécutives, de Novembre 2002 à Octobre 2004 pour le sorgho et de Juin 2004 à Mai 2006 pour le mil, sur la station ICRISAT de Samanko (12°32'N, 8°04'W), située à 15 km au sud-est de Bamako. L'évolution des dates d'initiation paniculaire et d'apparition de la feuille-drapeau est donc précisément décrite, de même que la relation entre les nombres de feuilles initiées et apparues qui permet d'estimer la date de l'initiation paniculaire à l'aide de la date d'apparition de la feuille-drapeau et du nombre total de feuilles produites.

Les 10 variétés ont été semées à la station INRA-CIRAD de Lavalette (43°38'N, 3°04'E), située au nord de Montpellier, France, les 19 mai, 22 juin et 20 juillet 2006. A chaque date de semis, chaque variété était semée dans une parcelle de 4 lignes de 5 m, distantes entre-elles de 0.75 m, dans des poquets distants de 0.20 m et démariée à 1 plante/poquet deux semaines après la levée. Dans chaque parcelle 10 plantes successives étaient repérées et les feuilles de la tige principale marquées afin de noter chaque semaine le nombre de feuilles apparues, ligulées et sénescents ainsi que la hauteur de la plante. Les dates des stades feuille-drapeau et floraison ont été enregistrées par parcelle comme la date à laquelle 50% des plantes d'une des lignes de la parcelle avaient atteint le stade concerné (feuille-drapeau déployée, floraison de la moitié de la panicule). Enfin le 17 et le 18 Octobre, avant l'arrivée du froid, les 10 plantes de ces placettes de suivi ont été prélevées et disséquées dans toutes les parcelles dans lesquelles le stade feuille-drapeau n'avait pas été atteint. Chez 106 des 111 des plantes disséquées l'initiation paniculaire avait été clairement franchie et aucune parcelle ne comportait plus d'une plante non initiée ; il a donc été possible de déterminer le nombre moyen de feuilles totales produites avant l'initiation paniculaire par chaque variété et pour chaque date de semis. La date de l'initiation paniculaire est estimée à partir de la cinétique du nombre de feuilles apparues, du nombre total de feuilles apparues et les relations bilinéaires fixes entre les nombres de feuilles apparues et initiées mises en évidence précédemment, sous l'hypothèse que le nombre de feuilles totales qui a été initié par l'apex est égal au nombre total de feuilles apparues à la fin du cycle.

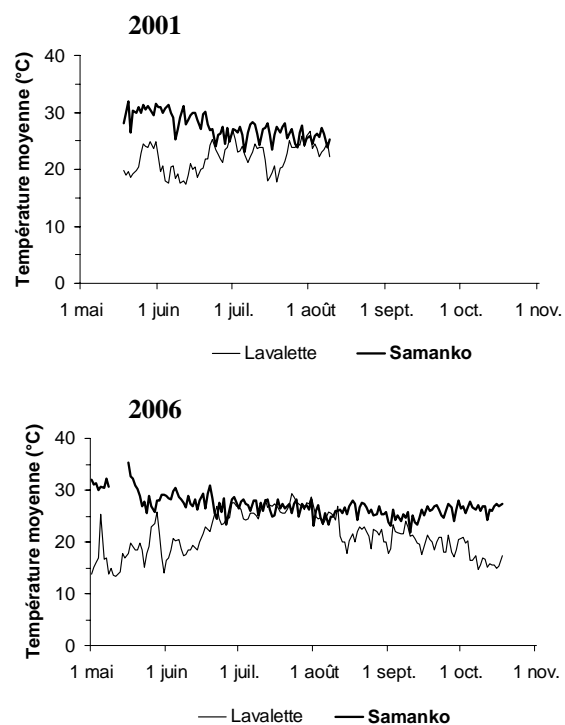


Fig. 3 : Températures quotidiennes moyennes sur les stations de Lavalette (Montpellier) et Samanko (Bamako) en 2001 et 2006.

Par conséquent on estime le nombre de feuilles déjà apparues au moment de l'initiation de la dernière feuille :

$$Nfa_IP = b0 + b1 * \min(nftot, seuilnf) + b2 * \max(0, nftot - seuilnf)$$

avec Nfa_IP, nombre de feuilles déjà apparues au moment de l'initiation paniculaire ; nftot, le nombre total de feuilles émises au cours du cycle ; seuilnf, nombre de feuilles au point d'inflexion de la relation bilinéaire et b0, b1 et b2 coefficients. Les paramètres de l'équation sont reportés dans le tableau ci-dessous :

	b0	b1	seuilnf	b2
Sorgho	- 1.36	0.741	21.7	0.995
Mil	- 1.7	0.793	22.6	0.991

Une fois connu le nombre de feuilles apparues au moment de l'initiation paniculaire, il est aisé d'estimer la date de l'initiation paniculaire à partir de la cinétique d'apparition des feuilles, notée chaque semaine. Nfa_IP est encadré par 2 notations successives pour lesquelles nfa, le nombre moyen de feuilles apparues est inférieur puis supérieur à Nfa_IP, aux dates D et D+1. Une interpolation linéaire sur la base des nombres de feuilles entre ces deux bornes permet l'estimation de la date de l'initiation paniculaire.

Les températures maxi et mini quotidiennes ont été enregistrées par une station automatique gérée par l'INRA située à environ 500 m de l'essai (Fig. 3).

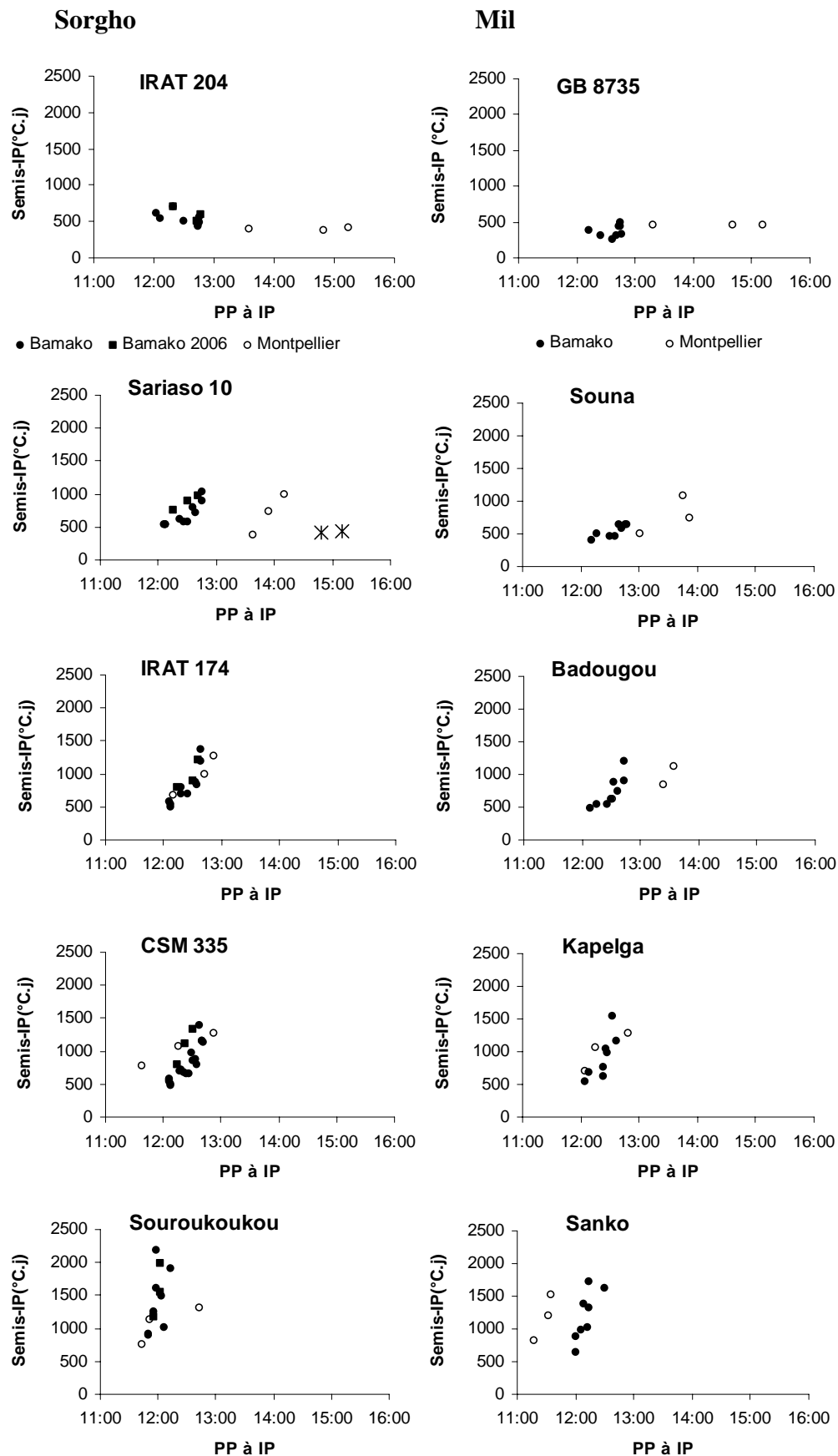


Fig. 4 : Relation entre la durée de la phase semis-initiation paniculaire et la photopériode au moment de l'initiation paniculaire chez 5 variétés de sorgho et 5 variétés de mil cultivées à Bamako (symboles fermés, ● : 2000-2004, ○ : 2006) et à Montpellier (symbole ouvert, ○, 2006). Les données recueillies pour Sariason 10 à Montpellier en 2001 ont été ajoutées (*).

Résultats et discussions

1. La date d'initiation paniculaire

Les relations entre la durée de la phase végétative et la photopériode à la date de l'initiation paniculaire confirment l'observation de T. Lafarge : les relations établies sur la période mai-août à Bamako ne sont pas transposables à la latitude de Montpellier (Fig. 4). Pour quelques variétés intermédiaires ces relations pourraient apparaître voisines mais il s'agit de situations justement intermédiaires entre le comportement des variétés précoces, qui initient sous des photopériodes plus élevées à Montpellier qu'à Samanko et des variétés plus tardives telle que Sanko où l'inverse est observé.

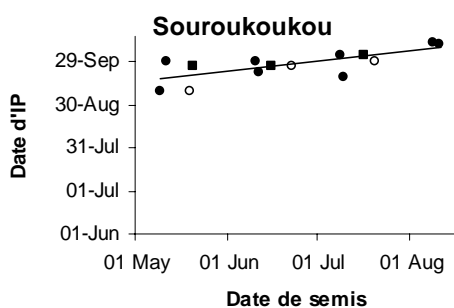
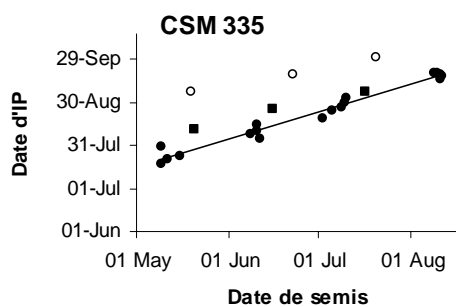
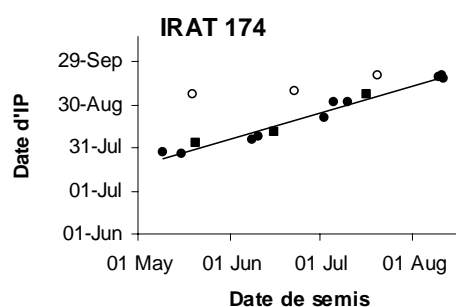
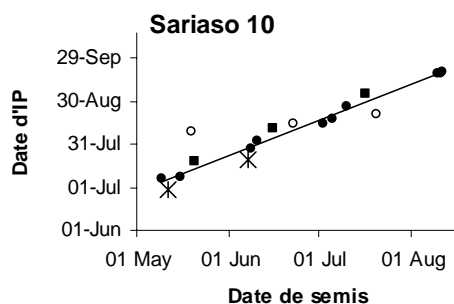
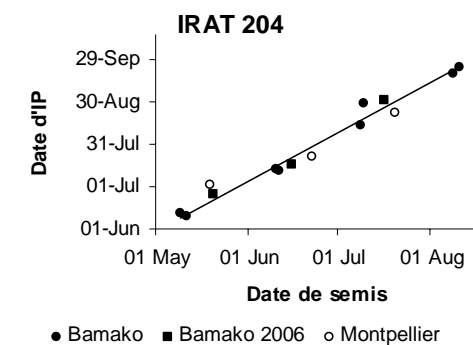
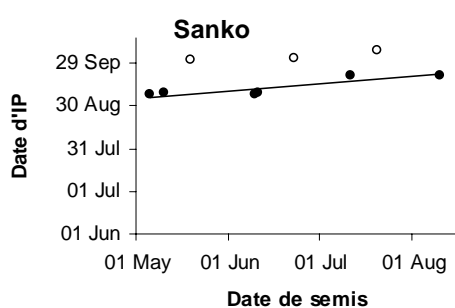
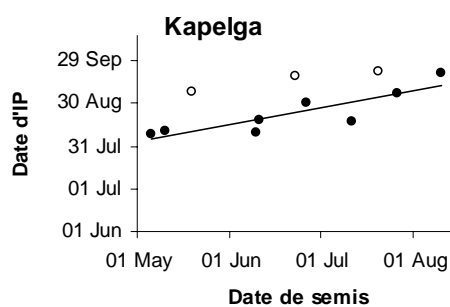
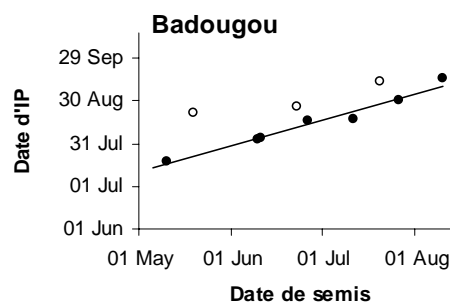
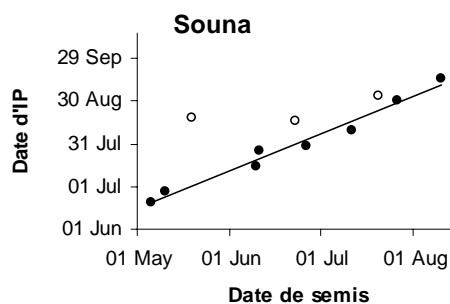
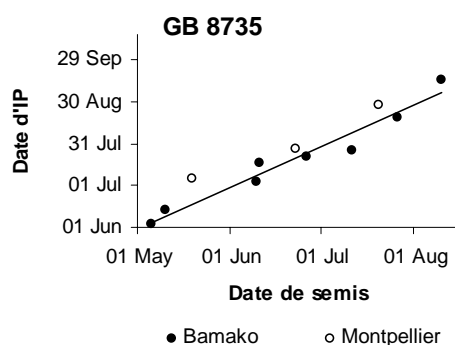
Sorgho**Mil**

Fig. 5 : Relation les dates d'initiation paniculaire et de semis chez 5 variétés de sorgho et 5 variétés de mil cultivées à Bamako (symboles fermés, ● : 2000-2004, ○ : 2006) et à Montpellier (symbole ouvert, 2006). Les données recueillies pour Sariason 10 à Montpellier en 2001 ont été ajoutées (*).

Les dates d'initiation paniculaire ne sont pas plus conservées d'une latitude à l'autre (Fig. 5). Les dates d'initiation paniculaire ont été plus tardives à Montpellier qu'à Samanko pour les 5 variétés de mil et pour 2 des 5 variétés de sorgho. Les dates d'initiation paniculaire des variétés de sorgho enregistrées en 2006 ont été conformes à celles de la série 2000-2002, chez trois des cinq variétés mais plus tardives chez Sarioso 10 et CSM 335. Les cinq années de mesure sur CSM 335, de 2000 à 2004, avaient montré une variabilité de la date d'initiation paniculaire de l'ordre de 10 jours pour une date de semis. Le résultat de 2006 remet cette estimation en cause.

Pour Sarioso 10, le résultat de 2006 à Samanko est totalement différent de celui de 2001. En 2006, Sarioso 10 a été nettement plus tardive à Montpellier et s'est comportée comme une variété fortement photopériodique, avec une faible pente entre les 3 points caractérisant les 3 dates de semis (cf. la variété Souroukougou). En 2001, au contraire, cette variété avait été un peu plus précoce à Montpellier avec la même réaction légèrement photopériodique (pente plus faible que pour IRAT 2004) à Montpellier et à Samanko. En 2006, les variétés de mil de cycle intermédiaire, Souna et Badougou, ont montré le même type de différence que Sarioso 10 entre les 2 stations. Pour expliquer cette différence, une hypothèse tiendrait aux fortes chaleurs du mois de juillet en France qui aurait provoqué un retard de la floraison de variétés de sorgho d'origine en partie tropicale (J. Chantereau, comm. pers.). Les données de température de Lavalette indiquent en effet un mois de juillet en moyenne plus chaud en 2006 qu'en 2001 (26.5 contre 22.7 °C) mais peu modifié à Samanko (26.9 contre 26.3 °C) (Fig. 3). Par conséquent l'hypothèse de la température ne peut expliquer les retards de la date d'initiation paniculaire chez Sarioso 10 et CSM 335 à Samanko. En 2006, les températures moyennes du mois de Juillet ont donc été identiques à Montpellier et Samanko, et par conséquent dans la gamme de croissance habituelle du sorgho. Dans ces conditions, la variété non-photopériodique IRAT 204 a atteint l'initiation paniculaire aux mêmes dates sur les deux stations et l'absence d'un stress hydrique à Montpellier est démontrée par les cinétiques linéaires du développement foliaire (Fig. 6).

Sur la période considérée, de mai à début août, la relation entre la date de l'initiation paniculaire et la date de semis à Samanko est proche d'une relation linéaire chez toutes les variétés. La pente de cette relation tend vers 1 pour les variétés non photopériodiques (IRAT 2004) et vers 0 pour les variétés très photopériodiques (Souroukougou). Cette relation apparaît aussi linéaire à Montpellier chez la plupart des variétés, sauf chez IRAT 174, Souna et Badougou.

Chez la variété de sorgho très tardive, Souroukougou, l'initiation paniculaire de toutes les plantes s'est produite à des dates proches, identiques aux 2 latitudes, entre mi-septembre et début octobre, au moment de l'équinoxe d'automne. La photopériode est alors de 12 heures en tout point de la planète.

Cette première expérience de l'effet de latitude sur la date de l'initiation paniculaire, associée à une synthèse des données existantes, permet d'éliminer l'hypothèse de l'absence d'interaction entre la latitude et la date d'initiation paniculaire, extension des observations de Curtis jusqu'aux hautes latitudes. Il n'émerge pourtant pas de solution claire. Au contraire, la grande variabilité de la date de l'initiation paniculaire de Sarioso 10 à Montpellier soulève de nouvelles questions. Ce type de résultat a été observé au passage des dates-seuils dans les essais conduits à Samanko. Y aurait-il un seuil de la réaction photopériodique des variétés du type de Sarioso 10 (IRAT 174, Souna et Badougou) franchit entre la mi-mai et la mi-juin à Montpellier ? Les données de ce rapport constitue donc un premier pas vers la compréhension de l'effet de la latitude dans la réaction photopériodique. Les effets mesurés à Bamako et à Montpellier ne sont pas conformes à ceux attendus dans le cadre de l'hypothèse des plantes de jours courts.

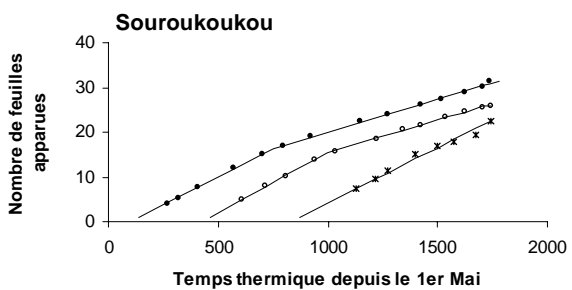
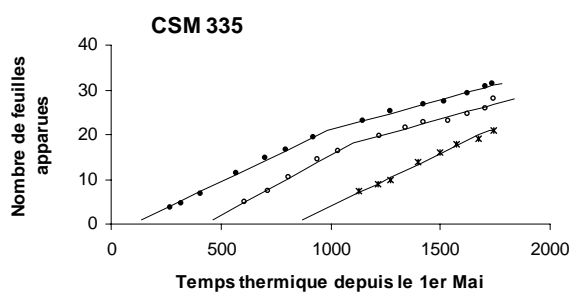
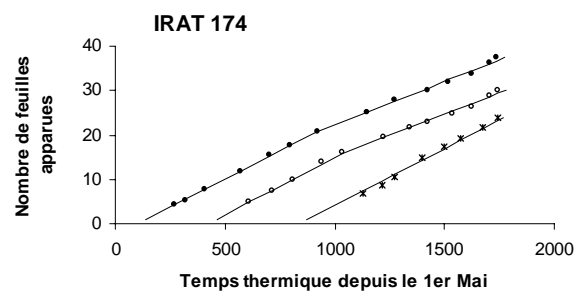
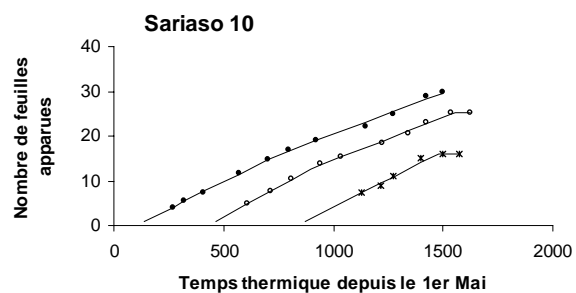
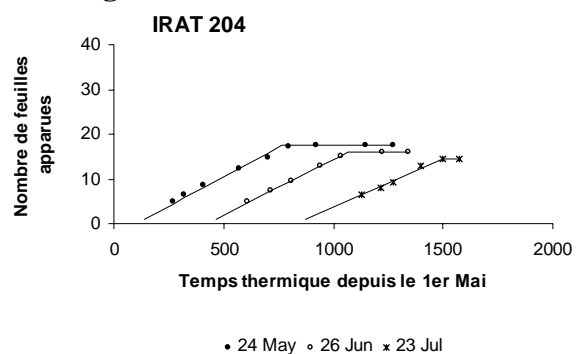
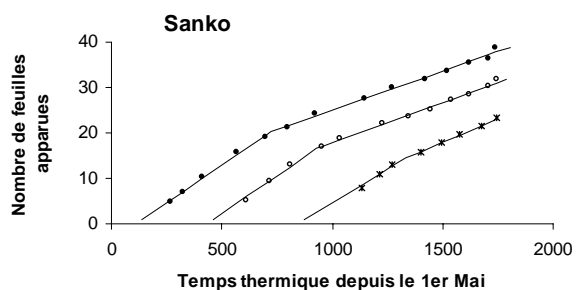
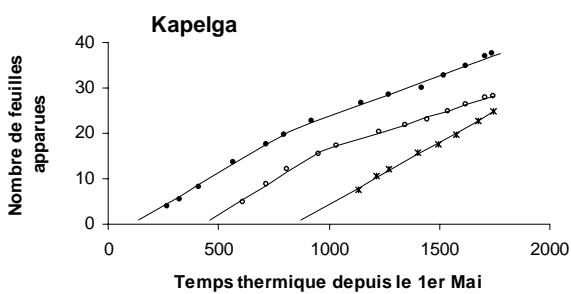
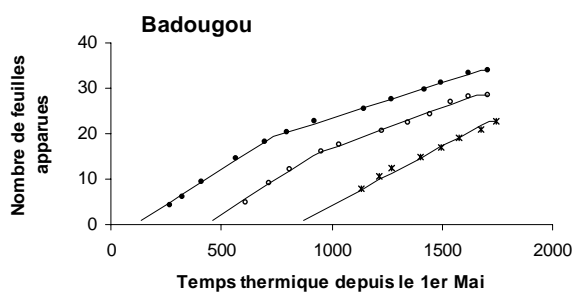
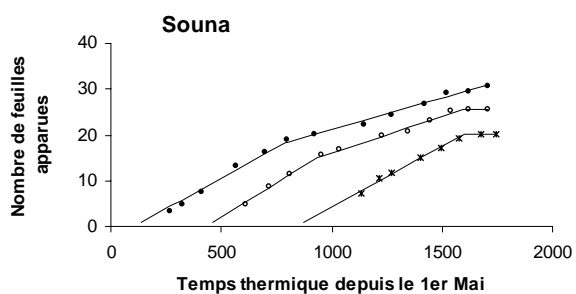
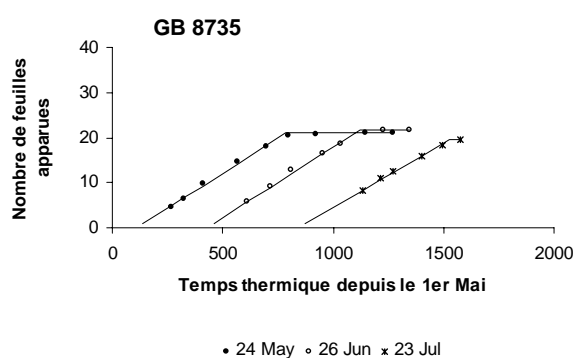
Sorgho**Mil**

Fig. 7 : Cinétiques d'apparition des feuilles chez 5 variétés de sorgho et 5 variétés de mil semées à Montpellier en mai, juin et juillet 2006.

Cette hypothèse n'est pas non plus suffisante pour expliquer l'ensemble des résultats enregistrés dans les expériences de semis mensuels en une même localité ce qui a amené à rechercher d'autres facteurs que la photopériode pouvant avoir une influence sur la date de déclenchement de la mise à fleur. La variation quotidienne des heures de lever et de coucher du soleil est un candidat sérieux (Fig. 6).

Une réaction combinée des plantes aux deux variations créeraient des dates particulières non dépendantes de la latitude, lorsque les courbes de variation se croisent (11 fév., 15 mai, 26 juil., 4 nov.) ou éventuellement sont à leur distance maximale (26 mars, 21 juin, 17 sept., 23 déc.). Le 15 mai, qui se trouve dans cette liste, est par conséquent susceptible de constituer une date seuil de la réaction photopériodique alors qu'il n'y pas d'autre signal qui présente une évolution particulière à cette période. Pour autant cette hypothèse ne permet pas de proposer un schéma général de prédiction de la date d'initiation paniculaire en fonction de la latitude. Une plus grande quantité d'observations sera nécessaire. Une expérience de semis mensuels de 10 variétés tropicales entre les latitudes 0° et 20° est en cours en 2007 qui apportera des informations entièrement originales sur cette question.

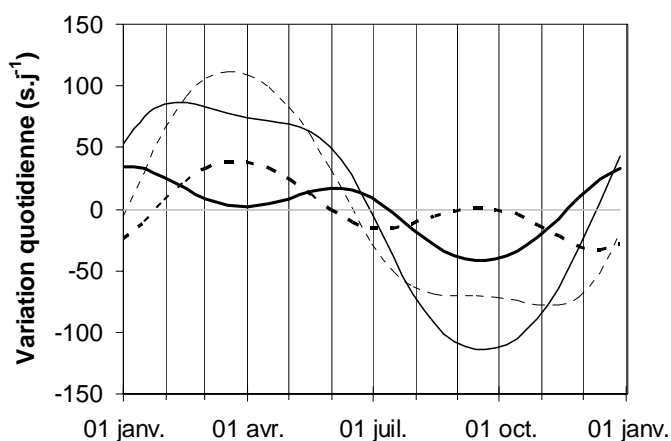


Fig. 6 : Evolution quotidienne de la variation des heures de lever (lignes pointillées) et de coucher (lignes continues) du soleil à Bamako (traits gras) et Montpellier (traits fins).

2. Les cinétiques d'apparition des feuilles

A Montpellier en 2006, les cinétiques d'apparition des feuilles pour les 10 variétés aux 3 dates de semis ont respecté la linéarité attendue (Fig. 7). En particulier, il n'y a eu aucune période de ralentissement des rythmes d'apparition des feuilles en fonction du temps thermique, ce qui prouve que les plantes n'ont pas subi de stress hydrique ou thermique majeur.

Les cinétiques d'apparition des feuilles des variétés précoces IRAT 204 et GB 8735 qui ont émis 20 feuilles ou moins, ont été linéaires pour les trois dates de semis. Elles ont été bilinéaires pour les semis de mai et de juin pour 7 des 8 autres variétés et bilinéaires pour les 3 dates de semis pour la variété de mil Sanko.

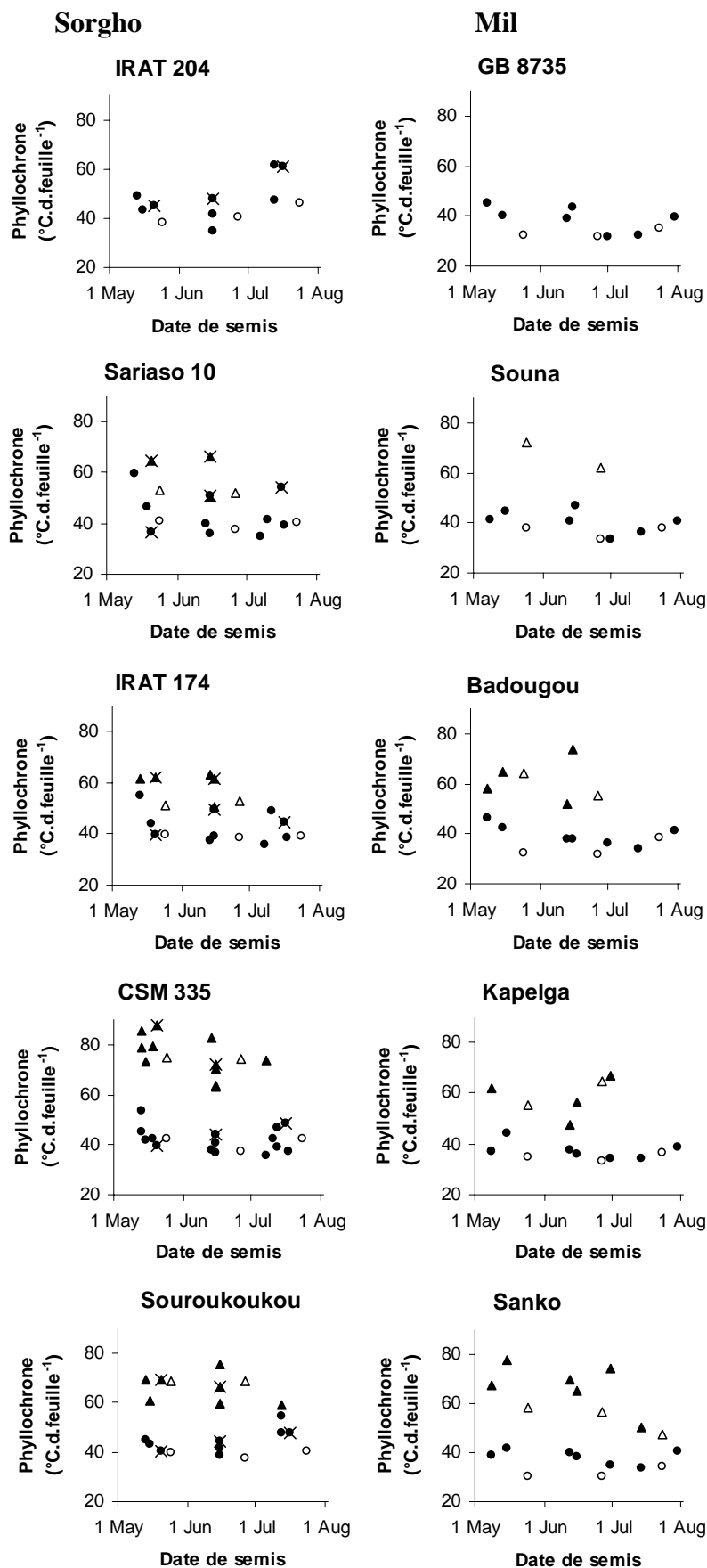


Fig. 8 : Relations entre les phyllochrones initiaux (●) et secondaires (▲) chez 5 variétés de sorgho et 5 variétés de mil cultivées à Bamako (symboles fermés : 2000-2004, avec croix superposées : 2006) et à Montpellier (symbole ouvert, 2006).

Les valeurs des phyllochrones initiaux mesurés à Montpellier ont généralement été incluses à l'intérieur de la zone de variation de ces phyllochrones mesurés à Bamako, sauf peut-être pour les mils Badougou et Sanko (Fig. 8). La variabilité des mesures des phyllochrones secondaires réalisée à Bamako est plus grande mais les valeurs enregistrées à Montpellier ont aussi été du même ordre de grandeur qu'à Bamako. Pour les variétés de sorgho Sarioso 10 et IRAT 174, la frontière entre les valeurs des phyllochrones initiaux et secondaires est confuse, en particulier parce que les valeurs des phyllochrones initiaux des semis de juin et juillet 2006 à Bamako ont été anormalement élevées chez les variétés de sorgho précoces (et pas chez les 2 variétés tardives).